

JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

**METODOLOGIA INTEGRADA PARA O GERENCIAMENTO
DE ATIVOS NO SETOR ELÉTRICO BASEADA NO APOIO À
DECISÃO MULTICRITÉRIO E NA INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL**

**FLORIANÓPOLIS
2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA INTEGRADA PARA O
GERENCIAMENTO DE ATIVOS NO SETOR ELÉTRICO
BASEADA NO APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO E NA
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^o Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D.Eng.

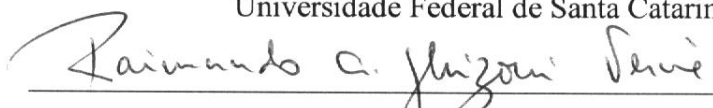
JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

Florianópolis, Maio de 2009.

METODOLOGIA INTEGRADA PARA O GERENCIAMENTO DE ATIVOS NO SETOR ELÉTRICO BASEADA NO APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO E NA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



Prof. Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D. Eng.

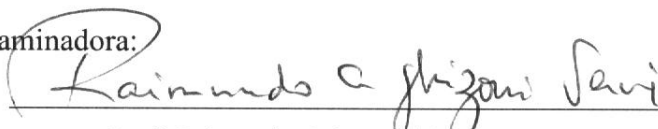
Orientador



Prof.ª Kátia Campos de Almeida, Ph. D.

Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

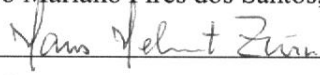


Prof. Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D. Eng.

Presidente


Prof. Germano Lambert-Torres, Ph. D.


Prof. Cícero Mariano Pires dos Santos, D. Eng.


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.


Prof. Jorge Coelho, D. Sc.


Prof. C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.


Prof. Rubiara Cavalcante Fernandes, D. Eng.

*Para meus pais e irmãos,
base da minha vida.*

*Para Mariana e Lucas,
luz do meu caminho e força para a minha luta.*

*Para Katiane,
minha baixinha,
pelo carinho e companheirismo.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e orientador Professor Raimundo Celeste Ghizoni Teive, por me trazer de volta ao ambiente da pesquisa, pela inestimável orientação que garantiu o êxito deste trabalho e pela confiança em mim depositada.

Aos Engenheiros Ivan Barbosa de Amorin e Juliano Ricardo da Silva do Departamento de Engenharia de Itaipú Binacional, pela transmissão do conhecimento na área de manutenção de transformadores de força.

Aos Professores Germano Lambert-Torres, Cícero Mariano Pires dos Santos, Hans Helmut Zürn, Jorge Coelho, C. Celso de Brasil Camargo e Rubiara Cavalcante Fernandes, pela participação na banca examinadora e pelas contribuições ao trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, pela liberação para esta capacitação e pelo apoio técnico e financeiro, e aos amigos do Departamento Educacional de Eletrotécnica pelo apoio e incentivo no decorrer deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica pelo apoio técnico e financeiro.

METODOLOGIA INTEGRADA PARA O GERENCIAMENTO DE ATIVOS NO SETOR ELÉTRICO BASEADA NO APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO E NA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

Maio/2009

Orientador: Prof^o Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D.Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia.

Palavras-chave: Gerenciamento de Ativos, Apoio à Decisão Multicritério, Inteligência Artificial, Transmissão de Energia Elétrica.

Número de Páginas: 218.

RESUMO: O Gerenciamento de Ativos é considerado uma atividade estratégica no âmbito das empresas de energia elétrica, merecendo a atenção de pesquisadores e profissionais do setor elétrico, que têm por objetivo propor metodologias que substituam a prática tradicional que considera apenas a minimização de custos e a maximização da confiabilidade na definição de políticas de compra, operação, manutenção e substituição de equipamentos e que, em alguns casos, se baseia apenas na experiência e no conhecimento dos profissionais das áreas envolvidas no processo, sem nenhum caráter científico. Apresenta-se neste trabalho, uma metodologia para o tratamento do problema de Gerenciamento de Ativos, concebida sobre as bases da teoria do Apoio à Decisão Multicritério e da técnica de Sistemas Especialistas *Fuzzy* e que considera os valores e objetivos de cada indivíduo participante do processo de tomada de decisão. Para a aplicação dessa metodologia utiliza-se um modelo computacional modularizado, a partir de uma abordagem multicritério, do conhecimento especializado e do tratamento matemático da incerteza, buscando estruturar o problema e fornecer aos indivíduos responsáveis pelo gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos nas empresas do setor elétrico, informações referentes aos efeitos de ações alternativas de manutenção sobre aspectos técnicos, econômicos e ambientais e sobre o cumprimento da missão da empresa, subsidiando a tomada de decisão.

INTEGRATED METHODOLOGY TO ASSET MANAGEMENT ON ELECTRIC UTILITIES BASED ON MULTICRITERIA DECISION AIM AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

May/2009

Advisor: Prof^o Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D.Eng.

Area of Concentration: Energy Systems.

Keywords: Asset Management, Multicriteria Decision Aim, Artificial Intelligence, Electric Energy Transmission.

Number of Pages: 218.

ABSTRACT: The Asset Management is considered a strategic activity on electric utilities, deserving attention of researchers and professionals of electric area, who has as objective to propose methodologies to replace the traditional practices that consider only the costs minimization and the reliability maximization to define policies of purchasing, operation, maintenance and replacement of equipments and that in some cases, its based only on experience and knowledgement of professionals of areas involved in the decision-making process, without cientific background. In this work is presented a methodology to deal with the Asset Management problem, conceived above the basis of the Multicriteria Decision Aim theory, integrated with Fuzzy Expert Systems technique, considering the values and objectives of the individuals who participate of the decision making process. To applicate this methodology use a modulated computational model with a multicriteria approach, the expert knowledgement and the uncertainty treatment, to structure the problem and to provide to the individuals responsible at management of the life cycle of the equipments in electric utilities, informations about the effects of the maintenance alternatives actions on technical, economical and environmental aspects and on utilities mission, to the decision make.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Uma Visão Geral do Gerenciamento de Ativos.....	1
1.2 Motivação para o Trabalho Proposto... ..	2
1.3 Aspectos Regulatórios dos Serviços de Transmissão e de Distribuição de Energia Elétrica.....	3
1.4 Objetivo Geral e Objetivos Específicos do Trabalho.....	4
1.4.1 Objetivo Geral.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Estrutura do Texto.....	5
2. GERENCIAMENTO DE ATIVOS NAS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 O Conceito de Gerenciamento de Ativos.....	7
2.3 A Abrangência do Gerenciamento de Ativos no Setor Elétrico.....	11
2.4 A Importância das Políticas de Manutenção e de Substituição de Equipamentos.....	13
2.5 O Gerenciamento de Ativos Baseado nas Condições do Equipamento.....	17
2.5.1 O Monitoramento e o Diagnóstico das Condições de Equipamentos no Setor Elétrico.....	17
2.5.2 Manutenção Baseada no Tempo versus Manutenção Baseada na Condição.....	19
2.6 O Gerenciamento de Ativos com Foco nos Transformadores de Força.....	20
2.6.1 O Processo de Deterioração de Transformadores de Força.....	21
2.6.2 O Monitoramento e o Diagnóstico de Transformadores de Força – Utilização do Conhecimento Especializado.....	22
2.7 Modelos para o Gerenciamento de Ativos no Setor Elétrico.....	24
2.8 Conclusões.....	29
3. METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO.....	31
3.1 Introdução.....	31
3.2 A Tomada de Decisão como uma Situação Complexa.....	32
3.3 Os Paradigmas Científicos.....	33
3.3.1 O Paradigma Racionalista.....	33
3.3.2 O Paradigma Construtivista e a Consideração do Subjetivismo.....	34

3.4 O Apoio à Decisão.....	36
3.4.1 Os Indivíduos Envolvidos no Processo de Apoio à Decisão.....	37
3.4.2 Definição e Etapas do Processo de Apoio à Decisão.....	38
3.5 Metodologia Clássica para o Apoio à Decisão.....	39
3.5.1 Identificação do Contexto Decisório.....	40
3.5.2 Estruturação do Problema – Mapas Causais e Pontos de Vista Fundamentais.....	41
3.5.3 Estruturação do Modelo Multicritério - Avaliação Local e Global de Alternativas.....	46
3.6 Críticas à Metodologia Clássica.....	53
3.7 Conclusões.....	55
 4. SISTEMAS ESPECIALISTAS, LÓGICA FUZZY E MAPAS CAUSAIS FUZZY.....	 57
4.1 Introdução.....	57
4.2 O Conhecimento Especializado no Gerenciamento de Ativos.....	57
4.3 A Lógica <i>Fuzzy</i> e o Tratamento da Incerteza.....	58
4.3.1 Complexidade, Credibilidade e Incerteza na Modelagem de um Problema.....	59
4.4 As Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i> e o Isomorfismo com a Lógica <i>Fuzzy</i>	60
4.4.1 Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i>	61
4.4.2 O Isomorfismo entre Conjuntos <i>Fuzzy</i> e Lógica <i>Fuzzy</i>	62
4.5 Sistemas <i>Fuzzy</i>	63
4.5.1 Mecanismo de Inferência na Lógica Clássica.....	64
4.5.2 Definição, Estrutura e Operação de um Sistema <i>Fuzzy</i>	65
4.5.3 Mecanismo de Inferência na Lógica <i>Fuzzy</i>	67
4.6 A Lógica <i>Fuzzy</i> na Tomada de Decisão.....	69
4.7 Mapas Causais <i>Fuzzy</i>	70
4.7.1 Relações de Influência entre Conceitos de um Mapa Causal.....	71
4.7.2 Mapas Concisos.....	72
4.7.3 Mapas Causais com Pesos.....	73
4.7.4 Mapas <i>Fuzzy</i>	75
4.7.5 Mapas <i>Fuzzy</i> Baseados nos Modelos de Kosko e Zhang.....	78
4.8 Conclusões.....	80
 5. METODOLOGIA PROPOSTA PARA O APOIO À DECISÃO NO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DE TRANSFORMADORES DE FORÇA.....	 82
5.1 Introdução.....	82
5.2 Premissas Básicas da Metodologia Proposta.....	82
5.3 O Gerenciamento de Ativos Segundo a Metodologia Proposta.....	83
5.4 A Consideração do Impacto Ambiental no Gerenciamento do Ciclo de Vida de Transformadores de Força.....	85
5.5 Modelo de Aplicação da Metodologia Proposta.....	86

5.6 O Módulo 1 do Modelo de Aplicação.....	88
5.6.1 O Método <i>First Passage Time</i>	90
5.6.2 O Método <i>Monte Carlo</i>	91
5.6.3 Avaliação Clássica.....	93
5.7 O Módulo 2 do Modelo de Aplicação.....	98
5.7.1 Avaliação da Condição do Equipamento por Meio do Diagnóstico de Falhas Incipientes.....	99
5.7.2 Considerações Adicionais sobre o Diagnóstico de Falhas Incipientes.....	109
5.7.3 Avaliação do Nível de Risco da Falha Terminal.....	109
5.7.4 Proposição de Linhas de Ação Plausíveis.....	111
5.8 O Módulo 3 do Modelo de Aplicação.....	113
5.8.1 Formulação do Processo de Inferência Causal.....	114
5.8.2 Construção de um Mapa Causal Segundo a Metodologia Proposta.....	117
5.8.3 Conversão de um Mapa Causal em Mapa Causal <i>Fuzzy</i>	117
5.8.4 Avaliação Estratégica Quantitativa.....	118
5.8.5 Tratamento das Incertezas no Processo de Inferência Causal.....	120
5.9 Análise do Impacto Ambiental Inserida na Avaliação Estratégica.....	122
5.10 Abordagem Monocritério para a Comparação das Estratégias de Ação.....	125
5.11 Abordagem Multicritério para a Comparação das Estratégias de Ação.....	126
5.11.1 A Formulação de um Problema de Otimização Multiobjetivo.....	126
5.11.2 O Conceito de Otimalidade ou Dominância de Pareto.....	127
5.11.3 Abordagem Multicritério na Metodologia Proposta.....	128
5.12 Conclusões.....	129
6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	131
6.1 Introdução.....	131
6.2 Considerações Iniciais.....	131
6.3 Características dos Transformadores Analisados.....	132
6.4 Dados para a Avaliação Econômica.....	132
6.5 Estudo de Caso 1.....	134
6.6 Estudo de Caso 2.....	154
6.7 Conclusões.....	170
7. CONCLUSÕES GERAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	172
7.1 Conclusões Gerais.....	172
7.2 Propostas para Trabalhos Futuros.....	175
ANEXO 1. MÉTODOS DE ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE DE TRANSFORMADORES.....	177
A.1.1 Método NBR-7274.....	177
A.1.2 Método de Doernenburg.....	178
A.1.3 Método de Duval.....	180

ANEXO 2. MÉTODOS PARA A SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	181
A.2.1 Processos Estocásticos e Processos de Markov.....	181
A.2.2 Modelagem de Equipamentos Elétricos por meio de Cadeias de Markov.....	182
A.2.3 Simulação da Operação do Equipamento por meio do Método <i>First Passage Time</i>	183
A.2.4 Critério de Convergência do Método <i>Monte Carlo</i>	187
APÊNDICE 1. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS MÓDULOS 2 e 3.....	189
A.3.1 Exemplo de Aplicação do Módulo 2.....	189
A.3.2 Exemplo de Aplicação do Módulo 3.....	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	210

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AMP** – *Asset Management Planner*.
- ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica.
- CBM** – *Condition Based Maintenance*.
- CEMIG** – Companhia Energética de Minas Gerais.
- COFINS** – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.
- CTEEP** – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.
- DGA** – *Dissolved Gas Analysis*.
- DVDP** – Duração Verificada de Desligamento Programado.
- DVOD** – Duração Verificada de Outros Desligamentos.
- EP** – Efeito parcial.
- ET** – Efeito total.
- FPT** – *First Passage Time*.
- GA** – Gerenciamento de Ativos.
- IA** – Inteligência Artificial.
- IEC** – *International Electrotechnical Commission*.
- IEEE** – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- MACBETH** – *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*.
- MAUT** - *Multi-attribute Utility Theory*.
- MBC** – Manutenção Baseada na Condição.
- MBT** – Manutenção Baseada no Tempo.
- MCC** – Manutenção Centrada na Confiabilidade.
- MGAT** – Modelo para o Gerenciamento de Ativos de Transmissão.
- MTBF** – *Mean Time Between Failure*.
- ONS** – Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- PB** - Pagamento Base.
- PIS** – Programa de Integração Social.
- PO** – Pesquisa Operacional.
- PVE** – Ponto de Vista Elementar.

PVF – Ponto de Vista Fundamental.

PVI – Parcela Variável por Indisponibilidade.

RAP – Receita Anual Permitida.

RCM – *Reliability Centered Maintenance*.

RIBAM – *Risk-based Asset Management*.

SE – Sistema Especialista.

SSD – Sistema de Suporte à Decisão.

TBM - *Time Based Maintenance*.

VPFCL – Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** – Áreas e entidades relacionadas com o Gerenciamento de Ativos no setor elétrico.
- Figura 2.2** – Panorama geral do processo de Gerenciamento de Ativos.
- Figura 2.3** – Curvas de vida de um equipamento para duas estratégias de manutenção.
- Figura 3.1** – Identificação do problema a ser resolvido – Paradigma Racionalista.
- Figura 3.2** - Identificação dos problemas individuais – Paradigma Construtivista.
- Figura 3.3** – Participantes do processo de apoio à decisão.
- Figura 3.4** – Relacionamento entre atores e ações em um processo de apoio à decisão.
- Figura 3.5** – Representação esquemática do processo de apoio à decisão.
- Figura 3.6** - Primeiro pólo e pólo oposto de um conceito.
- Figura 3.7** - Importância da definição do pólo oposto.
- Figura 3.8** – Obtenção de um mapa causal congregado.
- Figura 3.9** – Árvore de PVFs e PVEs.
- Figura 3.10** - Níveis de impacto para o PVF “custo de manutenção preventiva”.
- Figura 3.11** – Função de valor – Método da Pontuação Direta.
- Figura 3.12** – Planilha para o julgamento semântico – Programa MACBETH.
- Figura 3.13** – Função de valor – Método MACBETH.
- Figura 4.1** – Estrutura de um Sistema *Fuzzy*.
- Figura 4.2** – Mapa causal e relações de influência entre conceitos.
- Figura 4.3** – Mapa conciso e relações de influência entre conceitos.
- Figura 4.4** – Mapa causal e pesos para as relações de influência.
- Figura 4.5** – Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por termos linguísticos.
- Figura 4.6** - Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por intervalos.
- Figura 4.7** - Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por intervalos de termos linguísticos.
- Figura 5.1** – Visão global do Gerenciamento de Ativos segundo a metodologia proposta.
- Figura 5.2** – Fluxo de informações entre os módulos do modelo de aplicação.
- Figura 5.3** – Fluxograma do módulo de simulação da operação do equipamento.
- Figura 5.4** – Cadeia de Markov para a simulação da operação do equipamento.

- Figura 5.5** – Simulação da operação do equipamento – Método *Monte Carlo*.
- Figura 5.6** – Fluxograma do processo de diagnóstico *fuzzy* de falhas incipientes.
- Figura 5.7** – Modelos de regras para a aplicação do conhecimento heurístico.
- Figura 5.8** – Função de pertinência para a variável “concentração de acetileno” – Aplicação do conhecimento heurístico.
- Figura 5.9** – Modelos de regras para a confirmação de operação sem falha.
- Figura 5.10** – Função de pertinência para a variável “concentração de monóxido de carbono”.
- Figura 5.11** – Modelos de regras para diagnosticar a natureza da falha pelo método NBR-7274.
- Figura 5.12** – Modelo de regra para diagnosticar a natureza da falha pelo método de Doernenburg.
- Figura 5.13** – Funções de pertinência para as variáveis “relação acetileno/etileno” e “relação etano/acetileno”.
- Figura 5.14** - Modelo de regra para o diagnóstico combinado.
- Figura 5.15** – Modelo de regra para diagnosticar a natureza da falha pelo método de Duval.
- Figura 5.16** – Modelo de regra para a avaliação do nível de risco da falha terminal.
- Figura 5.17** – Funções de pertinência para as variáveis “tempo até a falha terminal” e “custo da falha terminal”.
- Figura 5.18** – Mapa causal *fuzzy* composto por quatro conceitos.
- Figura 5.19** – Modelo de regra para a implementação do operador “min”.
- Figura 5.20** – Funções de pertinência para o efeito sobre a missão da empresa.
- Figura 5.21** – Mapa *fuzzy* com julgamento incerto.
- Figura 5.22** – Modelo de regra para a avaliação ambiental.
- Figura 5.23** – Funções de pertinência para as variáveis “manuseio de resíduos”, “transporte de resíduos” e “armazenamento de resíduos”.
- Figura 5.24** – Funções de pertinência para a variável “frequência da manutenção preventiva”.
- Figura 5.25** – Funções de pertinência para a variável “horizonte para a substituição do equipamento”.

Figura 6.1 – Curva de vida do transformador 1 – Estratégia tradicional de manutenção.

Figura 6.2 – Desempenho técnico das estratégias alternativas- Estudo de Caso 1.

Figura 6.3 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Figura 6.4 – Mapa *fuzzy* para o cenário de preferências dos decisores - Estudo de Caso 1.

Figura 6.5 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Figura 6.6 – Linhas de argumentação correspondentes aos melhores efeitos da estratégia 1.

Figura 6.7 – Comparação final das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Figura 6.8 – Curvas de vida do transformador 2 – Estratégia Tradicional e Estratégia 6.

Figura 6.9 – Regras disparadas para a avaliação do nível de risco da falha – Estratégia 6.

Figura 6.10 – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Figura 6.11 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Figura 6.12 – Mapa *fuzzy* para o cenário de preferências dos decisores – Estudo de Caso 2.

Figura 6.13 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Figura 6.14 – Representação gráfica da defuzzyficação pelo método do centróide.

Figura 6.15 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas - Cortes $\alpha = 0,5$ e $0,8$.

Figura 6.16 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas desconsiderando as incertezas – Estudo de Caso 2.

Figura A.2.1 – Cadeia de Markov a dois estados.

Figura A.2.2 – Representação iSj de uma cadeia de Markov para o cálculo do FPT_{ij} .

Figura A.3.1 – Fuzzyficação da variável “concentração de acetileno”.

Figura A.3.2 – Regra disparada para definir operação com falha - Conhecimento Heurístico.

Figura A.3.3 – Fuzzyficação da variável “relação acetileno/etileno” – Método NBR-7274.

Figura A.3.4 – Regras disparadas para a obtenção dos códigos do método NBR-7274.

Figura A.3.5 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico pelo método NBR-7274.

Figura A.3.6 – Fuzzyficação da variável “relação etano/acetileno” – Método de Doernenburg.

Figura A.3.7 – Regras disparadas para a confirmação da existência de falha e para a validação das relações de gases pelo método de Doernenburg.

Figura A.3.8 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico pelo método de Doernenburg.

Figura A.3.9 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico combinado.

Figura A.3.10 – Fuzzyficação da variável “custo da falha terminal”.

Figura A.3.11 – regras disparadas para a avaliação do nível de risco da falha terminal.

Figura A.3.12 – Regra disparada para a proposição das linhas de ação plausíveis.

Figura A.3.13 – Árvore de busca para o diagnóstico de falha incipiente.

Figura A.3.14 – Exemplo de mapa causal *fuzzy*.

Figura A.3.15 – Fuzzyficação da variável “custo de inspeção e manutenção preventiva”.

Figura A.3.16 – Fuzzyficação das intensidades das ligações intermediárias.

Figura A.3.17 – Exemplo de um mapa causal *fuzzy* com julgamentos incertos.

Figura A.3.18 – Regras disparadas para a obtenção do efeito parcial $EP_{1-5-10-11}$.

Figura A.3.19 – Árvore de busca para a obtenção do efeito parcial $EP_{1-5-10-11}$.

Figura A.3.20 – Funções de pertinência da variável “efeito sobre a missão da empresa” e defuzzyficação pelo método do centróide.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

- Quadro 3.1** – Propriedades dos pontos de vista fundamentais.
- Quadro 3.2** – Propriedades do conjunto de pontos de vista fundamentais.
- Quadro 4.1** – Correspondência entre operações com conjuntos *fuzzy* e proposições *fuzzy*.
- Quadro 5.1** – Formulação do método do valor presente do fluxo de caixa líquido.
- Quadro 5.2** – Variáveis de entrada e de saída do módulo 2.
- Quadro 5.3** – Linhas de ação plausíveis fornecidas pelo módulo 2.
- Quadro 5.4** – Variáveis de entrada e de saída do módulo 3.
- Quadro 6.1** – Diagnóstico combinado e nível de risco da falha – Estudo de Caso 1.
- Quadro 6.2** – Linhas de ação e estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.
- Quadro 6.3** – Linhas de argumentação principais.
- Quadro 6.4** – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 1.
- Quadro 6.5** – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 2.
- Quadro 6.6** – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 3.
- Quadro 6.7** – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 4.
- Quadro 6.8** – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 5.
- Quadro 6.9** – Exemplo de análise do tipo *What-If* - Estudo de Caso 1.
- Quadro 6.10** – Diagnóstico combinado e nível de risco da falha – Estudo de Caso 2.
- Quadro 6.11** – Linhas de ação e estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.
- Quadro 6.12** – Avaliação do nível de risco da falha para a estratégia 6.
- Quadro 6.13** – Melhores desempenhos da estratégia tradicional.
- Quadro 6.14** – Melhores desempenhos da estratégia 6.
- Quadro 6.15** – Melhores desempenhos da estratégia tradicional utilizando corte $\alpha = 0,5$.
- Quadro 6.16** – Melhores desempenhos da estratégia 6 utilizando corte $\alpha = 0,5$.
- Quadro 6.17** – Melhores desempenhos da estratégia tradicional desconsiderando as incertezas.
- Quadro 6.18** – Melhores desempenhos da estratégia 6 desconsiderando as incertezas.
- Tabela 5.1** – Diagnóstico de falhas, utilizando a versão *fuzzy* do método de Duval.
- Tabela 5.2** – Resultados possíveis para o processo de inferência.
- Tabela 5.3** – Desempenhos de soluções para um problema com dois aspectos de avaliação.

- Tabela 6.1** – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.
- Tabela 6.2** – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.
- Tabela 6.3** – Desempenhos quanto ao impacto ambiental – Estudo de Caso 1.
- Tabela 6.4** – Desempenho técnico das novas estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.
- Tabela 6.5** – Desempenho econômico das novas estratégias alternativas–Estudo de Caso 1.
- Tabela 6.6** – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.
- Tabela 6.7** – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.
- Tabela 6.8** – Desempenhos quanto ao impacto ambiental – Estudo de Caso 2.
- Tabela A.1** – Códigos gerados pelas relações de gases – Método NBR-7274.
- Tabela A.2** – Identificação da natureza da falha – Método NBR-7274.
- Tabela A.3** – Valores limites para operação com falha - Método de Doernenburg.
- Tabela A.4** – Identificação da natureza da falha – Método de Doernenburg.
- Tabela A.5** – Identificação da natureza da falha - Método de Duval.

1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo procura-se inicialmente, apresentar uma visão geral do Gerenciamento de Ativos nas empresas do setor elétrico, descrevendo-se sucintamente, de que forma tal atividade vem sendo conduzida e alertando para a sua complexidade. Em seguida, apresentam-se os fatores que motivaram o desenvolvimento do trabalho proposto e algumas considerações sobre os aspectos regulatórios relativos à transmissão e à distribuição de energia elétrica. Por fim, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho e a forma de estruturação do texto que se segue.

1.1 Uma Visão Geral do Gerenciamento de Ativos

O Gerenciamento de Ativos (GA) no setor elétrico consiste em um conjunto de atividades envolvendo a compra de equipamentos novos, a manutenção preditiva, preventiva e corretiva dos equipamentos existentes e a substituição desses equipamentos, visando o alcance de objetivos, tais como a minimização de custos e a maximização da confiabilidade e tendo como restrições, aspectos como a escassez de recursos financeiros e a minimização dos períodos de não suprimento, entre outros. Uma significativa quantidade de publicações tem destacado a relevância e o caráter estratégico do Gerenciamento de Ativos, como será visto no capítulo seguinte, destinado entre outras coisas: a uma revisão bibliográfica para mostrar de que forma o GA tem sido definido e à apresentação de alguns modelos para a solução do

problema.

A busca de soluções para o Gerenciamento de Ativos no setor elétrico vem sendo orientada tradicionalmente, por planos de manutenção e de substituição de equipamentos caracterizados por uma periodicidade previamente definida por fabricantes ou, em alguns casos por especialistas pertencentes às empresas. Observa-se ser esse, um procedimento que pode ir de encontro ao objetivo de gerenciar de forma eficaz o ciclo de vida desses equipamentos, seja sob o ponto de vista técnico, ou sob o ponto de vista econômico, fato já destacado por inúmeros pesquisadores que alertam para a necessidade da busca por planos de ação caracterizados pela flexibilidade na definição dos intervalos entre manutenções, do momento para a substituição de um equipamento existente e dos aspectos a serem considerados para a tomada de decisão.

Deve-se destacar aqui, a complexidade da busca de soluções para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos elétricos, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas, do significativo fluxo de informações, das dificuldades de uma modelagem matemática e da existência de diversos indivíduos envolvidos de forma direta ou indireta, com interesses muitas vezes conflitantes.

1.2 Motivação para o Trabalho Proposto

Um dos pontos básicos que serviu de motivação para a proposição desse trabalho foi a convicção de que o Gerenciamento de Ativos pode contribuir para o alcance dos objetivos de atendimento aos requisitos de continuidade, qualidade e segurança, principalmente diante das restrições existentes quanto à ampliação e renovação dos sistemas de energia elétrica. Aspectos como redução de custos e aumento de receitas, continuidade e qualidade de suprimento e atendimento às imposições do agente regulador, bem como a redução do impacto ambiental e a melhoria da imagem corporativa, podem ser alcançados a partir de políticas eficazes para o GA, buscando as melhores alternativas de manutenção e substituição de

equipamentos.

Além disso, a complexidade, já mencionada na seção anterior torna evidente a necessidade de se dar um tratamento científico e sistemático ao problema, permitindo a consideração dos mais diversos aspectos envolvidos, o que corresponde certamente, a uma das contribuições desse trabalho. Como contribuições adicionais pode-se apontar a consideração do conhecimento especializado, o tratamento probabilístico dado a algumas variáveis de caráter essencialmente aleatório e o tratamento matemático dado às incertezas inerentes ao problema.

1.3 Aspectos Regulatórios dos Serviços de Transmissão e de Distribuição de Energia Elétrica

Para garantir o cumprimento dos requisitos básicos de continuidade, qualidade e segurança, torna-se indispensável a supervisão das atividades das empresas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, no sentido de manter e até mesmo elevar os índices de desempenho. Para isso surgiu a necessidade de toda uma legislação visando o estabelecimento dos requisitos de suprimento. No caso brasileiro, atuando como agente regulador, cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regular e fiscalizar os serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, estimulando a melhoria desses serviços e zelando pela qualidade. A partir daí surgiu um acervo de documentos contendo as diretrizes básicas para a prestação dos serviços dos sistemas elétricos.

No que tange ao serviço de transmissão de energia elétrica, a Resolução Normativa nº 270 de 26 de junho de 2007 (ANEEL, 2007a), estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica. Dessa resolução, destaca-se que a qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica será medida com base na disponibilidade e na capacidade plena das instalações, sendo as mesmas

consideradas indisponíveis, por desligamento programado ou não programado e que o pagamento associado à plena disponibilização das instalações (Pagamento Base - PB) estará sujeito a desconto da Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), calculada conforme apresentado no referido documento.

Adicionalmente, para o caso específico do serviço de distribuição de energia elétrica, dispõe-se de um conjunto de resoluções específicas para cada empresa concessionária, no sentido de definir padrões e metas para os indicadores de continuidade. As metas são definidas para cada conjunto de unidades consumidoras, sendo mais ou menos restritivas, segundo o grau de importância do atendimento aos requisitos de qualidade em cada conjunto.

1.4 Objetivo Geral e Objetivos Específicos do Trabalho

Propõe-se com este trabalho, o alcance dos objetivos geral e específicos apresentados a seguir.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho proposto é desenvolver, com base no Apoio à Decisão Multicritério e na Inteligência Artificial, uma metodologia integrada para o Gerenciamento de Ativos nas empresas do setor elétrico, permitindo a geração e a avaliação de estratégias de ação concorrentes para gerenciar o ciclo de vida de transformadores de força e que pode ser adaptada para outros equipamentos.

1.4.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos a serem alcançados mediante a implementação de um modelo de aplicação da metodologia proposta, direcionado para a análise de transformadores

de força, podem ser listados:

- permitir a avaliação das condições do equipamento em análise, sob o ponto de vista da existência de falhas incipientes, por meio da utilização do conhecimento especializado e do raciocínio linguístico, combinados com os métodos usualmente empregados no setor elétrico para esse fim;
- permitir, de forma probabilística, a avaliação do nível de risco da falha terminal do equipamento em análise, considerando o tempo até a falha e os custos associados a essa falha;
- permitir a geração de estratégias de ação, com base no diagnóstico de falhas incipientes e na avaliação do nível de risco da falha terminal do equipamento;
- permitir a comparação das estratégias de ação concorrentes, segundo a avaliação tradicionalmente utilizada no setor elétrico, combinada com uma avaliação alternativa, que deve considerar, em conjunto com os aspectos técnicos e econômicos, os aspectos ambientais e o cumprimento da missão das empresas;
- desenvolver um modelo computacional modularizado, para a execução das tarefas de diagnóstico de falhas incipientes, avaliação do nível de risco da falha terminal e avaliação das estratégias de ação concorrentes;
- aplicar a metodologia proposta a estudos de caso realísticos, visando à busca de informações que orientem a tomada de decisão quanto às estratégias de ação para o gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força.

1.5 Estrutura do Texto

Para a apresentação e o bom entendimento da metodologia proposta, este texto foi estruturado como a seguir.

No Capítulo 2 apresenta-se, a partir de uma revisão bibliográfica, uma definição formal do Gerenciamento de Ativos nas empresas do setor elétrico, focada posteriormente nos transformadores de força, mostrando de que forma alguns autores definem o problema, que aspectos estão envolvidos na busca de soluções e que modelos têm sido propostos para a obtenção de resultados. No Capítulo 3, apresenta-se e faz-se uma análise crítica da metodologia clássica de apoio à decisão, na qual se baseia a abordagem multicritério dada ao problema de Gerenciamento de Ativos no setor elétrico, segundo a metodologia proposta.

No Capítulo 4 são apresentados os Sistemas Especialistas *Fuzzy*, como extensão dos sistemas especialistas convencionais e a metodologia de Mapas Causais *Fuzzy*, a serem agregadas ao apoio à decisão multicritério, servindo como base para a metodologia a ser proposta no Capítulo 5. No Capítulo 6 apresentam-se dois estudos de caso para ilustrar a aplicação da metodologia proposta e no Capítulo 7, as conclusões gerais e propostas para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se dois anexos referentes, respectivamente, ao diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de força e à simulação probabilística da operação desses equipamentos; um apêndice, com exemplos de utilização do modelo de aplicação e as referências bibliográficas.

2

GERENCIAMENTO DE ATIVOS NAS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO

2.1 Introdução

Neste capítulo procura-se, com base na literatura existente, definir o Gerenciamento de Ativos, mostrar sua relevância e complexidade, bem como alguns modelos já implementados e que contribuem para a definição de ações para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos elétricos.

2.2 O Conceito de Gerenciamento de Ativos

Diversos autores utilizam termos diferentes para conceituar o Gerenciamento de Ativos. No entanto, todos abordam o que parece ser a essência dessa atividade estratégica dentro das empresas do setor elétrico: “o Gerenciamento de Ativos é um processo que visa orientar a utilização dos ativos físicos de uma empresa, no sentido de otimizar o ciclo de vida dos mesmos”. Em outras palavras, é a partir desse processo que serão definidas as políticas de operação e manutenção dos equipamentos, desde a sua aquisição, até o momento mais adequado para a sua substituição.

Steed (1998) estabelece que o Gerenciamento de Ativos significa gerenciar uma instalação durante toda a sua vida, desde a especificação, instalação, comissionamento, operação e manutenção, até a tomada de decisão pelo reforço ou substituição dos ativos que a compõem. O autor destaca o monitoramento das condições dos ativos (o que medir, como

medir e o que fazer com as informações obtidas) como forma de estimar o processo de envelhecimento dos mesmos, trazendo como benefícios: 1º) a redução dos custos de manutenção; 2º) a redução da probabilidade de ocorrência de falhas destrutivas; 3º) o aumento da segurança de operadores; 4º) o aumento da qualidade do suprimento; 5º) a limitação da severidade de qualquer dano ocorrido, com a eliminação das consequentes atividades de reparo; 6º) a identificação das causas das falhas.

Morton (1999) coloca o Gerenciamento de Ativos como a principal fonte de desembolsos das empresas de energia elétrica e apresenta a sua essência como sendo um processo de tomada de decisão para a redução dos custos de se manter um ativo em serviço e para estender o período de operação satisfatória do mesmo. O monitoramento da condição do ativo é considerado uma poderosa ferramenta para a obtenção das informações que irão contribuir para a tomada de decisão, ou seja, para definir como e quando efetuar as atividades de manutenção e quando efetuar a substituição.

Segundo Butera (2000), não existe uma definição padrão para Gerenciamento de Ativos, mas muitas empresas estão empenhadas nessa atividade e que embora os programas adotados pelas empresas pareçam ser diferentes, é lógico assumir a existência de elementos comuns tais como uma estrutura organizacional que permita a otimização da tomada de decisão relativa à utilização dos ativos físicos e o acompanhamento do desempenho e dos custos ao longo da vida útil desses ativos. O autor alerta para o fato de que a simples redução de custos pode ser benéfica no curto prazo, mas a longo prazo isso não protege contra o aparecimento dos problemas de ineficiência e de deterioração dos ativos e dos sistemas.

Ostergaard e Jensen (2001) consideram o Gerenciamento de Ativos como um método para explorar os ativos de uma empresa da maneira mais proveitosa possível e definem a questão de quando substituir esses ativos como uma das principais questões a serem respondidas. Os autores afirmam ser essa uma questão de difícil resposta, pelo fato de requerer a consideração de diversos parâmetros de natureza diferente, tais como dados de confiabilidade, custos de operação

e informações sobre as condições dos ativos.

No referido trabalho os autores definem o GA como:

- a combinação de Gerenciamento, Economia, Finanças, Engenharia e outras práticas aplicadas aos ativos físicos com o objetivo de alcançar o nível requerido de serviço, da maneira mais eficaz;
- o uso de um registro para os ativos, de um sistema de gerenciamento da manutenção, de gerenciamento de compra e venda e de recursos, de um controle de inventário, da avaliação das condições dos ativos e de níveis definidos de serviço, para estabelecer opções alternativas e previsões de longo prazo para fluxos de caixa;
- o uso de modelagem preditiva, gerenciamento de risco e técnicas de tomada de decisão para a renovação otimizada, no sentido de estabelecer opções de ciclo de vida para os ativos e previsões de longo prazo para fluxos de caixa.

Em outras palavras, para Osterggard e Jensen, o Gerenciamento de Ativos consiste na habilidade de modelar e comparar opções de operação, manutenção e investimento com uma meta, para definir soluções eficazes que resultem na capacidade requerida de suprimento ao longo do tempo. Segundo os autores, a questão ligada ao momento certo para a substituição de um ativo, bem como outras questões associadas à tomada de decisão ótima, são cada vez mais importantes dentro do setor elétrico, pelo aumento do foco na minimização de custos e na maximização da lucratividade. No entanto, os problemas associados são de natureza complexa e as questões são de difícil resposta e por isso, a maioria das decisões hoje são tomadas com base em cálculos limitados e uma grande quantidade de subjetividade.

Segundo Mohseni (2003), o Gerenciamento de Ativos é uma disciplina para a otimização e aplicação de estratégias relacionadas ao planejamento das decisões em investimento e produção durante o ciclo de vida dos ativos e que visa o alcance dos objetivos conflitantes de níveis de confiabilidade desejados e minimização de custos. O autor destaca os

pontos que devem ser considerados para a obtenção de soluções para o problema:

- um plano que otimize os investimentos em capital, operação e manutenção;
- um elo entre as informações operacionais e as informações financeiras dos ativos para que os custos associados ao ciclo de vida dos mesmos sejam quantificados e alavancados;
- um recurso computacional e uma base de dados que permitam a implementação de sistemas melhores e mais eficientes de planejamento e análise de confiabilidade;
- uma manutenção focada e um sistema de inspeção para monitorar a condição e o desempenho dos ativos, bem como os custos de manutenção e inspeção, para manter o nível de confiabilidade desejado.

Adicionalmente, na busca da solução para o problema, destacam-se os seguintes fatores a serem considerados: 1º) as estratégias de negócios das empresas; 2º) os impactos sobre a rede; 3º) os impactos sobre os consumidores; 4º) os impactos sobre o meio ambiente; 5º) a criticalidade dos ativos na rede.

Shahidehpour e Ferrero (2005) definem o Gerenciamento de Ativos como um processo de maximização do retorno do investimento em um equipamento, pela maximização do seu desempenho e minimização dos custos associados ao seu ciclo de vida e Arshad e Islam (2006) destacam que essa atividade dentro das empresas do setor elétrico, cresce em importância, devido ao tempo de operação dos equipamentos e ao fato de que alguns operam bem próximo ou acima das suas características nominais, para proporcionar redução de custos com a substituição. Brown e Humphrey (2005) também destacam a importância do Gerenciamento de Ativos diante do envelhecimento dos equipamentos e afirmam que gerenciar ativos de transmissão e distribuição de energia elétrica é mais complicado do que gerenciar ativos financeiros, devido a alguns aspectos não financeiros de desempenho e risco, necessidades de manutenção e substituição e o fato de que tais ativos fazem parte de sistemas complexos e interconectados. Para esses autores o GA é uma estratégia corporativa que busca o equilíbrio entre desempenho, custo e risco e que o alcance desse equilíbrio requer o

alinhamento das metas das empresas, com as decisões gerenciais e decisões técnicas.

Para concluir, deve-se destacar o trabalho de Tor e Shahidehpour (2006) que afirmam que o GA não é uma função simples e sim um conjunto de diferentes atividades executadas para encontrar o compromisso entre certos objetivos, tais como, rendimento, confiabilidade e custos. Os autores referem-se ao rendimento baseado no desempenho e na regulação, como forma de motivar as empresas a operar seus equipamentos de forma mais eficaz.

2.3 A Abrangência do Gerenciamento de Ativos no Setor Elétrico

De acordo com a literatura e conforme ilustrado na Figura 2.1, observa-se que o GA, além de estar relacionado às atividades de manutenção (além da compra e da substituição de equipamentos), de considerar aspectos relacionados à operação dos equipamentos e do sistema e de afetar e ser afetado por aspectos econômico-financeiros, deve estar direcionado para o ambiente externo, no sentido de atender aos aspectos de regulamentação impostos pelo agente regulador, promover a satisfação de acionistas e consumidores, reduzir o impacto ambiental com as atividades a serem executadas e contribuir para a promoção da imagem corporativa, bem como para vislumbrar novas oportunidades de negócios.

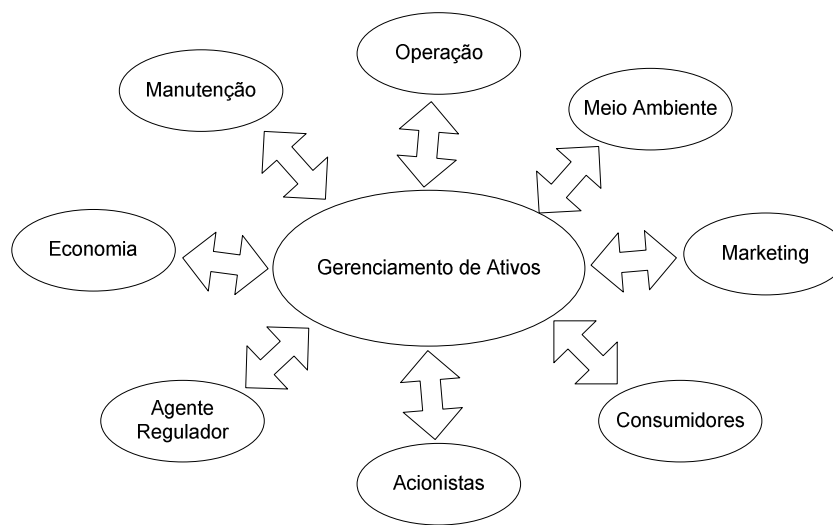


Figura 2.1 – Áreas e entidades relacionadas com o Gerenciamento de Ativos no setor elétrico.

Quak *et al.* (2003) destacam a complexidade do problema quando classificam as informações necessárias à solução em técnicas, econômicas e sociais e estabelecem que as decisões devem ser tomadas em nível de componente, de sistema e de empresa. Os autores também enfocam a necessidade de atendimento às expectativas conflitantes de diversos agentes interessados, tais como lucratividade, risco envolvido, nível de segurança, entre outros, e de envolvimento dos mais diversos setores das empresas. Kostic (2003) afirma que o gerenciamento do ciclo de vida dos ativos deve visar o oferecimento da quantidade suficiente de energia elétrica aos consumidores, com boa qualidade e a mínimo custo, sendo um processo de orientação para a aquisição, uso e retirada de ativos, para se obter o maior benefício econômico futuro e gerenciar os riscos e custos associados à vida útil dos mesmos. Essa definição torna explícitos o caráter gerencial, no que diz respeito à aquisição, a obtenção de benefícios econômicos, o gerenciamento de riscos e custos e o caráter técnico do Gerenciamento de Ativos, relacionado à utilização dos ativos, compreendendo as atividades de operação e manutenção.

Kostic também apresenta os três níveis de tomada de decisão (componente, sistema e empresa), reforçando a necessidade da participação de vários profissionais e do fluxo de informação entre as áreas, o que torna o problema mais complexo e conclui que o Gerenciamento de Ativos não é um processo simples, por envolver atividades diferentes para a obtenção de um ótimo global que considere confiabilidade e custos, satisfazendo à empresa e aos consumidores.

Núñez (2004), abordando o Gerenciamento de Ativos nos sistemas de transmissão, destaca que com o GA, deve-se buscar uma boa gestão dos equipamentos, atendendo aos aspectos regulatórios e aos interesses das empresas. Para a avaliação de estratégias alternativas, o autor fala em critérios econômico-financeiros e de confiabilidade, sendo que sob o ponto de vista financeiro, deve-se quantificar as receitas e as despesas relativas a cada alternativa e sob o ponto de vista de confiabilidade, deve-se buscar a quantificação dos índices tradicionalmente utilizados no setor. No mesmo trabalho, o autor ainda sugere a consideração

de aspectos tais como o impacto ambiental da manutenção e a imagem corporativa, usualmente não quantificáveis.

Brown e Humphrey (2005) afirmam que muitas empresas veem no Gerenciamento de Ativos a melhor forma de aumentar lucros, considerando que o serviço da transmissão e da distribuição de energia elétrica é intensivo em equipamentos. Shahidehpour e Ferrero (2005) falam de uma mudança de foco no Gerenciamento de Ativos, que deve considerar hoje, não a minimização de custos e sim o atendimento às expectativas de executivos e investidores pela maximização de lucros, as pressões de consumidores e agentes reguladores pela confiabilidade e o alinhamento com os objetivos das empresas. Os autores afirmam que isso requer novas estratégias de GA, bem como um melhor gerenciamento de informações.

2.4 A Importância das Políticas de Manutenção e de Substituição de Equipamentos

Costa (1995) destaca a busca de políticas de minimização de custos (enfoque econômico) ou maximização da disponibilidade dos equipamentos (enfoque técnico) e a importância da manutenção dos equipamentos existentes, considerando os elevados custos de aquisição de novos equipamentos. A autora cita ainda as vantagens da consideração de modelos probabilísticos, principalmente para a consideração das aleatoriedades associadas às diversas variáveis e para a redução dos custos de manutenção.

Endrenyi *et al.* (2001) apresentam, conforme Figura 2.2, um panorama geral do Gerenciamento de Ativos, dando destaque às atividades de manutenção como parte integrante do processo global. Conforme esses autores, pode-se considerar a manutenção preventiva (programada), a manutenção segundo as especificações dos fabricantes e a substituição pelo tempo e em quantidade como as estratégias tradicionais praticadas na grande maioria das

empresas. Os métodos empíricos, como a Manutenção Centrada na Confiabilidade¹ (MCC), aparecem como estratégias alternativas na busca de um elo entre manutenção e confiabilidade, dependendo significativamente do monitoramento das condições dos ativos e da experiência dos especialistas, não permitindo avaliar de forma quantitativa os efeitos da manutenção na confiabilidade de equipamentos e do sistema como um todo.

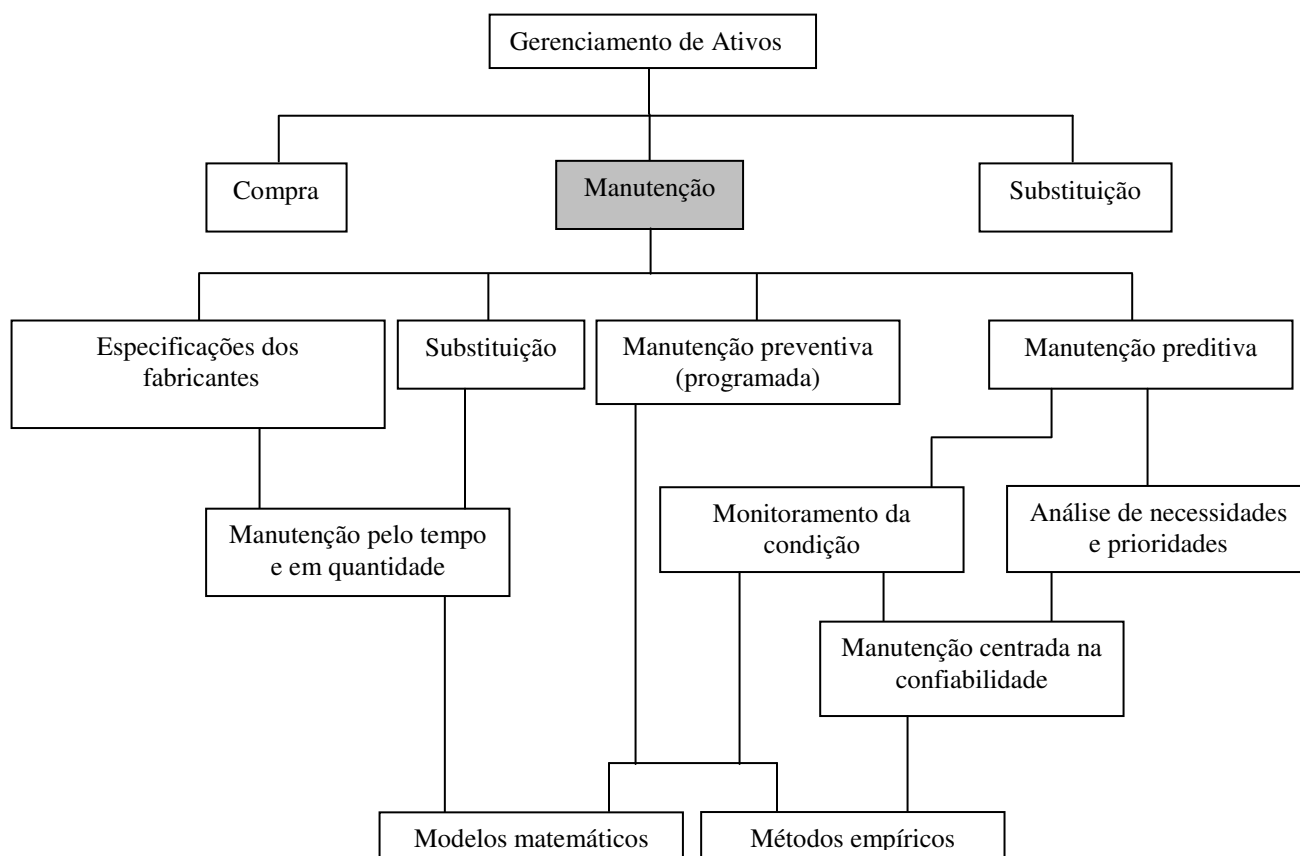


Figura 2.2 – Panorama geral do processo de Gerenciamento de Ativos.
Fonte: Endrenyi *et al.* (2001).

A manutenção preditiva baseada também no monitoramento das condições dos ativos e

¹ Na língua inglesa: *Reliability Centered Maintenance* – RCM.

a implementação de modelos matemáticos aparecem como propostas para a consideração dos efeitos da manutenção na confiabilidade e para a obtenção de soluções otimizadas para o problema. A otimização nesse caso pode considerar um critério único de análise ou considerar de forma agregada diversos critérios.

Para Morton (1999), a manutenção aparece apenas como um dos aspectos para a garantia da eficácia do Gerenciamento de Ativos, que pode ser influenciada não só pela quantidade e qualidade da manutenção executada, mas também pela habilidade de balancear benefícios e custos em uma estratégia global de substituição e investimento. A substituição indiscriminada de ativos apresenta custos elevados, existindo a necessidade de assegurar que os investimentos sejam direcionados para as áreas que proporcionam os maiores benefícios. Butera (2000) sugere a mudança da manutenção tradicional que visa a melhoria da segurança e da confiabilidade, sem uma análise quantitativa dos efeitos das ações adotadas, para uma atividade que tenha como objetivos a eliminação de gastos desnecessários com manutenção e investimentos, bem como a maximização de rendimentos. O resultado seria a transformação da manutenção pura e simples em programas de Gerenciamento de Ativos envolvendo compra, manutenção e substituição de equipamentos, que para serem bem sucedidos deveriam contemplar os seguintes elementos: 1º) as direções e metas da empresa; 2º) a manutenção preditiva focada na eliminação de custos; 3º) a manutenção preventiva eficaz; 4º) um sistema de informações eficiente e completo.

Em um trabalho focado para a manutenção de relés de proteção em sistemas de transmissão, Ulysséa (2002) afirma que a grande maioria das políticas de manutenção priorizam o enfoque econômico, principalmente quanto à redução dos custos de manutenção. O autor associa a manutenção com a segurança, o meio ambiente, a qualidade do produto, a disponibilidade e a contenção de custos.

Um importante ponto abordado por Ulysséa, é que inicialmente, por meio da manutenção corretiva, buscava-se o restabelecimento das condições originais dos equipamentos

e sistemas e que a partir de um certo momento, tal atividade foi direcionada para a manutenção preventiva, para garantir a disponibilidade da função desses equipamentos e sistemas, ou seja, o foco da manutenção deixa de ser a busca pelo reparo adequado e passa a ser a busca pela permanência em operação. O autor critica o fato de que muitos métodos de manutenção estão longe das pesquisas, sendo baseados no bom senso dos profissionais da área, com ações de manutenção baseadas em decisões subjetivas.

Neste ponto, alguns trabalhos apresentados em fóruns que buscam a troca de experiências entre profissionais do setor elétrico brasileiro devem ser citados. Camargo e Castella (2003) destacam a importância da manutenção para a qualidade e a disponibilidade, devido à escassez de recursos para novos projetos. Os autores também associam práticas de manutenção com a redução do impacto ambiental e com o aumento da competitividade das empresas. Dos Santos (2003) cita a realocação de reserva e de equipes de manutenção, a manutenção preventiva baseada nas especificidades de cada equipamento, inclusive com periodicidade variável e o monitoramento das condições desses equipamentos, como formas de reduzir a indisponibilidade. Vasconcellos (2003) cita os riscos ao meio ambiente, quando do processo de substituição de equipamentos (manipulação de óleo isolante) e demonstra preocupação com a imagem corporativa.

Tor e Shahidehpour (2006) criticam o fato de que a manutenção preventiva tradicional não considera a probabilidade e as consequências da falha, o que faz com que equipamentos submetidos a condições operativas distintas, sejam submetidos, de forma equivocada, ao mesmo programa de manutenção. Takahashi e Okamoto (2008) destacam a importância do balanço entre custos e confiabilidade, bem como da utilização de ferramentas de apoio à decisão. Quando afirmam que as empresas estão buscando estender a vida útil dos equipamentos, os autores tornam evidente a importância das atividades de manutenção para que a confiabilidade seja mantida.

2.5 O Gerenciamento de Ativos Baseado nas Condições do Equipamento

Nas subseções seguintes apresentam-se os pontos básicos que podem orientar uma mudança futura na direção adotada pelas empresas do setor elétrico, quanto ao Gerenciamento de Ativos. Trata-se da otimização do gerenciamento do ciclo de vida dos equipamentos, por meio da definição de políticas de manutenção baseadas nas condições operativas dos equipamentos.

2.5.1 O Monitoramento e o Diagnóstico das Condições de Equipamentos no Setor Elétrico

Monitorar um equipamento significa acompanhar, ao longo do tempo, o comportamento de grandezas características da operação do mesmo e o diagnóstico consiste na interpretação dos dados obtidos, visando determinar as suas condições de operação. Rimell (1999) destaca a importância do monitoramento dos ativos ou de seus componentes e dá ao Gerenciamento de Ativos um caráter estratégico quando diz que as atividades previstas devem estar integradas aos objetivos das empresas.

Reforçando a importância da avaliação das condições dos equipamentos, Hoskins, Strbac e Brint (1999) apresentam os resultados da previsão do processo de degradação do óleo isolante em chaves seccionadoras, utilizando modelo de Markov (Sim e Endrenyi, 1988 e Anders, 1990), como forma de incrementar o Gerenciamento de Ativos, tornando-o bem fundamentado para assegurar níveis satisfatórios de confiabilidade e de segurança para as redes de distribuição de energia elétrica.

Segundo Arshad, Islam e Khaliq (2004), as condições de carregamento e temperatura superiores aos valores nominais fazem com que o envelhecimento dos equipamentos não siga um ritmo padrão, o que demonstra que o gerenciamento do ciclo de vida desses equipamentos será mais eficaz, se forem utilizadas rotinas de monitoramento e diagnóstico, dentro da

chamada Manutenção Baseada na Condição² (MBC). Esse trabalho dá destaque à essa modalidade de manutenção, como forma de permitir a otimização dos custos de manutenção, recondição, reforço e monitoramento.

O monitoramento regular, combinado com a obtenção de diagnósticos realistas, segundo Arshad, Islam e Khaliq (2004), pode aumentar a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos e os autores citam alguns métodos de diagnóstico, entre eles, específicos para equipamentos isolados e refrigerados a óleo mineral, os de análise dos gases dissolvidos³, considerados pelos autores como ferramentas confiáveis para a avaliação das condições de um equipamento.

Os métodos de análise dos gases dissolvidos no óleo isolante permitem detectar falhas em estágio inicial (falhas incipientes⁴) e a adoção de ações que evitem a ocorrência de maiores danos. Lehtonen (2006) afirma que a identificação de falhas incipientes permite constatar o envelhecimento acelerado de um equipamento e, além disso, valoriza o monitoramento contínuo, destacando que muitas falhas desenvolvem-se muito rapidamente, a ponto de não serem identificadas a tempo, por procedimentos de inspeção periódica. Arvind, Khushdeep e Deepak (2008) associam o monitoramento e o diagnóstico ao novo modelo do setor elétrico, como forma de redução dos custos de operação e manutenção e de aumento da confiabilidade.

² Na língua inglesa: *Condition Based Maintenance – CBM*.

³ Na língua inglesa: *Dissolved Gas Analysis – DGA*.

⁴ Segundo a NBR-5462 (ABNT, 1994): Defeito representa qualquer desvio de um item em relação aos seus requisitos, podendo ou não afetar a sua capacidade de desempenhar uma função requerida. Falha representa um evento que resulta no término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Nesse texto, conforme a literatura sobre o tema, será utilizado o termo “falha incipiente” como referência a uma situação de defeito na isolação sólida ou líquida de um equipamento.

2.5.2 Manutenção Baseada no Tempo versus Manutenção Baseada na Condição

Nos trabalhos de Endrenyi, Anders e Da Silva (1998) e Endrenyi *et al.* (2001) são feitas críticas à Manutenção Baseada no Tempo⁵ (MBT), sob o argumento de que tal procedimento pode resultar em custos elevados e não estender a vida útil dos equipamentos, da forma esperada. Já se verificava, por parte desses autores, uma tendência no âmbito das empresas do setor elétrico, da adoção da Manutenção Baseada na Condição, já mencionada na Subseção 2.5.1.

Setayeshmehr *et al.* (2004) também criticam o procedimento tradicional de manutenção em intervalos fixos, já que tal prática pode resultar em saídas desnecessárias e além disso, falhas inesperadas podem ocorrer entre uma manutenção e outra. Os autores apontam a Manutenção Baseada na Condição como forma de otimizar a manutenção, ou seja, permitir a realização da manutenção no momento certo, com base nos resultados fornecidos pelo monitoramento e pelo diagnóstico dos equipamentos, citando inclusive, a importância da utilização de técnicas de Inteligência Artificial para o desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico.

Lehtonen (2006) também faz críticas à MBT, considerando tal modalidade de manutenção, muitas vezes ineficiente quanto aos custos e ao controle da vida útil do equipamento. Pengxiang *et al.* (2005) definem a Manutenção Baseada na Condição como um modo avançado de gerenciamento da manutenção, que não apenas evita o reparo tardio ou o reparo em demasia, mas também melhora a confiabilidade do serviço de energia elétrica.

Petrillo (2007), em estudo realizado no âmbito do setor elétrico brasileiro, demonstra que muitas empresas ainda planejam as atividades de manutenção com base em intervalos fixos, realizando as intervenções necessárias para a eliminação de defeitos identificados pelas

⁵ Na língua inglesa: *Time Based Maintenance* – TBM.

inspeções e/ou ensaios. O autor declara que o monitoramento, mencionado na Subseção 2.5.1, como forma de avaliação das condições operativas é ainda restrito a equipamentos de alto custo e de grande importância nos sistemas.

Esse autor conclui que, embora a prática atual garanta os padrões de excelência, existe a necessidade de se caminhar na direção da minimização das intervenções, por meio do aperfeiçoamento das técnicas de avaliação das condições dos equipamentos, buscando a melhor proporção entre a manutenção periódica e a manutenção baseada na condição.

Yadav *et al.* (2008) apresentam uma aplicação prática da Manutenção Baseada na Condição, por meio da análise dos resultados de um método de análise de gases, de um método de localização de descargas parciais, de um método para localização de arcos elétricos e de um método para a avaliação das condições físicas da parte ativa de um transformador de força. Os resultados obtidos geraram recomendações no sentido da retirada do equipamento de operação, para a identificação e reparo do problema existente.

2.6 O Gerenciamento de Ativos com Foco nos Transformadores de Força

Considera-se como principal objetivo do gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força, sugerir e implementar estratégias que orientem a operação, manutenção e substituição desses equipamentos, considerando aspectos técnicos de confiabilidade, aspectos econômicos de redução de custos e de aumento de receitas e aspectos socioambientais, sempre associando tais estratégias às condições de operação.

Trabalhos como os apresentados por Castillo (2003), Arshad, Islam e Khaliq (2004), Setayeshmehr *et al.* (2004) e Petrillo (2007) destacam os transformadores de força como componentes importantes dos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, tanto sob o ponto de vista da confiabilidade no suprimento, quanto pelos custos de reparo, as perdas de receita e os danos ambientais, resultantes das falhas desses equipamentos. Por esse

motivo, como afirmam Lúcio e Teive (2008), as empresas devem buscar a permanência desses equipamentos em boas condições de operação, garantindo competitividade, fornecendo aos consumidores a energia elétrica necessária, com qualidade e segurança e evitando as eventuais falhas.

2.6.1 O Processo de Deterioração de Transformadores de Força

Para a definição de estratégias eficazes para o gerenciamento do ciclo de vida dos transformadores de força é preciso entender que tais equipamentos podem sofrer deterioração natural ao longo do período de vida útil ou podem ter essa deterioração acelerada em função de serem submetidos à condições adversas de operação. Tal fato sugere que estratégias de manutenção e de substituição dos transformadores, baseadas no tempo, talvez não apresentem os resultados técnicos e econômicos desejados.

No guia IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991) e em Moraes (2004) e Zirbes, Rolim e Zürn (2005) aborda-se a deterioração da isolação sólida e líquida de transformadores de força, destacando-se os produtos originados dessa deterioração, em especial, gases tais como hidrogênio (H_2), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). Nos referidos trabalhos, apresentam-se métodos de análise de gases dissolvidos no óleo isolante de transformadores, como forma de identificar falhas incipientes, cuja existência requer a execução de intervenções visando à eliminação das mesmas.

Na análise de gases dissolvidos utilizam-se, para o diagnóstico de falhas, as concentrações e relações entre os gases produzidos pela deterioração da isolação sólida e líquida do transformador, comparando-se tais variáveis com limiares previamente definidos. Tal procedimento está inserido na metodologia proposta nesse trabalho e no Anexo 1 são descritos os métodos utilizados no modelo de aplicação.

Arshad, Islam e Khaliq (2004) apontam o carregamento e a temperatura acima dos valores de projeto, bem como a ocorrência de curto-circuitos e sobretensões, como os fatores que aceleram o envelhecimento dos transformadores de força, gerando o risco de falhas catastróficas. Conforme apontado por Zirbes, Rolim e Zürn (2005) e Arshad e Islam (2006), umidade e oxigênio aparecem como agentes de deterioração da isolamento sólida e líquida dos transformadores, diminuindo suas propriedades dielétricas.

Arvind, Khushdeep e Deepak (2008) ao apresentarem os fatores térmicos, elétricos e ambientais de envelhecimento, deixam claro que os transformadores de força são submetidos a processos de deterioração que ocorrem em ritmos diferentes, já que tais fatores devem atingir cada equipamento, de forma diferente.

2.6.2 O Monitoramento e o Diagnóstico de Transformadores de Força – Utilização do Conhecimento Especializado

Roizman e Davydov (1999) destacam a importância da identificação de falhas incipientes como forma de evitar a ocorrência das falhas catastróficas e propõem um sistema *neuro-fuzzy* para estimar a quantidade de umidade na isolamento sólida dos transformadores, por meio de medições *on-line* do conteúdo de umidade no óleo isolante. Moraes (2004) comenta a necessidade do aumento da confiabilidade dos resultados fornecidos pelas técnicas de diagnóstico e apresenta uma ferramenta para a detecção de falhas incipientes em transformadores de força, por meio da utilização conjunta de métodos de análise de gases dissolvidos no óleo isolante, com uma rede neural artificial e um sistema de inferência *fuzzy*, como forma de aumentar os percentuais de acerto quanto aos diagnósticos de operação normal, operação com falha elétrica e operação com falha térmica.

Zirbes, Rolim e Zürn (2005) destacam a importância da avaliação, sem intervenção, das condições do isolamento de transformadores, como forma de minimizar a indisponibilidade do equipamento. No referido trabalho, são discutidas a análise de gases

dissolvidos e os ensaios físico-químicos, tradicionalmente utilizados para a avaliação das condições e para a identificação de falhas, destacando-se os fatores de incerteza quanto aos valores medidos e à interpretação dos mesmos. Um método de diagnóstico baseado em redes neurais é proposto, indo ao encontro, segundo os autores, do significativo crescimento da aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) aplicadas ao diagnóstico de falhas.

Flores *et al.* (2007) afirmam que a análise da vida de transformadores de força deve ser feita de forma individual e destacam a importância do diagnóstico, como forma de permitir o tratamento diferenciado entre os equipamentos, em substituição aos planos definidos por intervalos fixos. Os autores apresentam técnicas que utilizam dados dos ensaios físico-químicos, técnicas que utilizam dados estatísticos e técnicas que utilizam a Inteligência Artificial, para a avaliação do percentual de vida de transformadores, listando as vantagens e as desvantagens de cada uma.

Moreira, Santos e Vellasco (2007) propõem um sistema de diagnóstico que combina a análise dos gases dissolvidos com ensaios físico-químicos, modelados por duas redes neurais artificiais, como forma de permitir a utilização de procedimentos de diagnóstico de utilização destacada, bem como do conhecimento especializado, para compensar as deficiências dos diversos métodos tradicionais, decorrentes, segundo os autores, da complexidade dos fenômenos que ocorrem nos transformadores e que provocam a deterioração da isolamento.

A utilização do conhecimento especializado é apontada por Moreira, Santos e Vellasco (2007) como uma das causas do sucesso das técnicas de diagnóstico de transformadores de força, propostas nos últimos anos e por isso afirmam ser de grande interesse que tal conhecimento seja estruturado e representado em uma ferramenta computacional inteligente. Lúcio e Teive (2008) incorporam esse conhecimento em um sistema especialista *fuzzy* que combina dois métodos tradicionais de análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, com o conhecimento heurístico dos especialistas.

Gockenbach e Borsi (2008) listam os resultados esperados de um sistema de diagnóstico das condições de transformadores de força: 1º) a extensão da vida útil dos equipamentos; 2º) a melhoria da possibilidade de carregamento; 3º) maiores disponibilidades; 4º) manutenção e reparos baseados na condição; 5º) a prevenção de perdas e destruição do equipamento.

Os autores destacam os avanços na área da Inteligência Artificial, como meios de permitir o desenvolvimento de ferramentas computacionais para o diagnóstico. Além disso, apontam também a Lógica *Fuzzy* para o tratamento das incertezas associadas às mudanças das condições de operação dos equipamentos e à informação imprecisa fornecida pelos operadores humanos.

2.7 Modelos para o Gerenciamento de Ativos no Setor Elétrico

Apresentam-se nesta seção alguns modelos propostos na literatura para a solução do problema de Gerenciamento de Ativos no setor elétrico. Destacam-se os objetivos específicos e as características básicas de cada modelo, os resultados apresentados e as contribuições para a solução do problema de Gerenciamento de Ativos no setor elétrico.

Sim e Endrenyi (1988) apresentaram um modelo para a minimização da indisponibilidade dos ativos, a partir da determinação do intervalo ótimo entre as atividades de manutenção preventiva, considerando-se que tanto a manutenção em excesso como a falta de manutenção resultam em elevados índices de indisponibilidade com a consequente elevação dos custos associados. O modelo de Sim e Endrenyi considera a ocorrência de dois tipos de falha: a falha devido ao envelhecimento dos ativos e a falha de caráter aleatório que pode ocorrer a qualquer instante ao longo da vida útil do mesmo.

Em seu trabalho, Sim e Endrenyi modelam os tempos para a falha de forma probabilística, atribuindo taxas de falha constantes e consequentemente tempos para a falha

também constantes e a indisponibilidade é definida como uma função dessas taxas de falha e das respectivas taxas de reparo. A deterioração dos equipamentos é modelada via processo de Markov e considera-se que as atividades de manutenção levam o equipamento para o estágio de deterioração anterior ao considerado. O modelo proposto contribui para a solução do problema de Gerenciamento de Ativos nos seguintes aspectos:

- permite a consideração do caráter aleatório de algumas variáveis envolvidas no problema;
- permite a modelagem do processo de envelhecimento dos ativos;
- permite a avaliação quantitativa dos efeitos da manutenção na indisponibilidade dos ativos.

Costa (1995) e De Siqueira (2003) adotaram o modelo proposto por Sim e Endrenyi, sendo que no primeiro trabalho, a autora utiliza a técnica de simulação *Monte Carlo* para a determinação do tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failure* – MTBF), para um sistema composto por n componentes. A simulação da operação dos componentes do sistema tem por objetivo considerar as aleatoriedades associadas ao estado dos mesmos (operação ou fora de operação). Endrenyi, Anders e Da Silva (1998) propuseram um modelo para a avaliação probabilística dos efeitos da manutenção na confiabilidade pela determinação dos tempos médios para a falha de um equipamento, submetido a diversas estratégias de manutenção. Cada estratégia de manutenção é simulada via processo de Markov, considerando como em Sim e Endrenyi (1988), o processo de envelhecimento dos equipamentos, a transição entre esses estados, estados de inspeção das condições dos mesmos e atividades de manutenção mais ou menos efetivas.

O modelo probabilístico denominado *Asset Management Planner* (AMP), conforme apresentado por Endrenyi, Anders e Da Silva (1998), permite modelar o tempo para a falha a partir do último estágio de deterioração como uma variável aleatória, definindo a sua função distribuição de probabilidade, por meio da técnica de simulação *Monte Carlo*. Isso permite aos decisores avaliar os riscos de adiamento das atividades de manutenção. O AMP foi aplicado à análise da manutenção de disjuntores a ar comprimido de 230 kV, apresentando como

resultados os tempos estimados para a falha, a partir de cada estágio de deterioração do equipamento em análise. Adicionalmente, um estudo de sensibilidade permitiu avaliar o comportamento dos custos totais de manutenção e falha, bem como da indisponibilidade do equipamento, em função da variação do tempo entre inspeções, o que permite a otimização com respeito a um desses dois critérios.

No trabalho de Anders, Endrenyi e Yung (2001) destaca-se que em muitas situações na operação dos sistemas de potência tem-se como maior preocupação a confiabilidade dos equipamentos e consequentemente do sistema, ficando em segundo plano os aspectos financeiros. Contudo no novo ambiente econômico envolvendo a desregulamentação e a globalização do suprimento de energia elétrica, aspectos de confiabilidade e financeiros devem ser considerados igualmente importantes. O modelo *Risk-Based Asset Management* (RIBAM) de Anders, Endrenyi e Yung (2001), utiliza, da mesma forma que o modelo AMP, o processo de Markov para a representação da transição entre os estados de deterioração, inspeção e manutenção dos equipamentos e adiciona o conceito de “curva de vida” para representar a variação do valor do equipamento em relação ao tempo. As curvas de vida, traçadas para diversas estratégias de manutenção, ilustram o efeito de cada uma dessas estratégias sobre o estado do equipamento, conforme a Figura 2.3 a seguir.

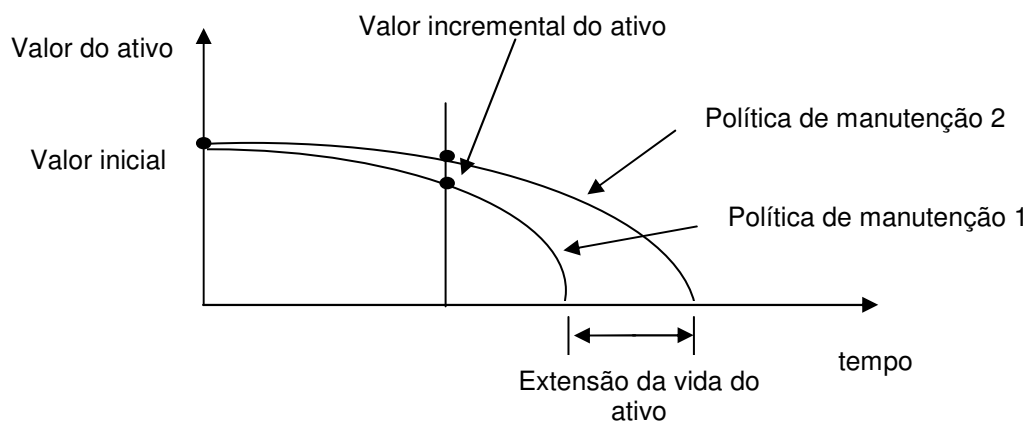


Figura 2.3 – Curvas de vida de um equipamento para duas estratégias de manutenção.
Fonte: Anders, Endrenyi e Yung (2001).

Na Figura 2.3 observa-se que, sob o ponto de vista de extensão da vida útil do equipamento, a política de manutenção 2 é a mais adequada, já que permite a sua operação por um tempo maior e a cada instante de tempo em particular, a condição do ativo é sempre melhor, se tal política de manutenção for adotada. Para a análise econômica, calculam-se para cada estratégia, os custos de falha, manutenção e da ação a ser adotada, levados a valor presente e considerando o atraso na implantação de cada ação. A análise de riscos é efetuada mediante a determinação da variação da probabilidade de falha em função do atraso da implantação de cada uma das estratégias analisadas. Com isso, tem-se três critérios de avaliação para a tomada de decisão: o critério econômico de minimização dos custos globais, o critério de extensão da vida útil dos equipamentos pela análise das curvas de vida e o critério de exposição ao risco dado pela probabilidade de falha.

Da Motta e Colosimo (2003) apresentaram os resultados da investigação do efeito da manutenção e das saídas por falha, na indisponibilidade, na parcela de receita variável e na lucratividade, para o caso específico da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Os dados de manutenção, defeitos e falhas foram obtidos do histórico da empresa e a partir daí, foram obtidas as funções de distribuição de probabilidade mais adequadas para os tempos até as falhas, até os defeitos e para o tempo de reparo e com isso, estimados os tempos médios entre falhas e entre defeitos e o tempo médio para o reparo das falhas e dos defeitos. Com as estimativas dos tempos médios, foi possível determinar a parcela variável da receita da transmissão, segundo metodologia definida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Como resultados os autores compararam os valores da parcela variável da receita da transmissão com os custos de manutenção, por classes de equipamentos de transformação. Ao se observar valores de parcela variável bem superiores aos custos de manutenção, para transformadores de 345 kV e 500 kV, chegou-se a conclusão de que a empresa deveria investir nas atividades de manutenção desses equipamentos, para garantir a viabilidade financeira na prestação do serviço de transmissão de energia elétrica.

Núñez (2004) propôs o Modelo para o Gerenciamento de Ativos de Transmissão (MGAT), ferramenta computacional de suporte à decisão, possibilitando uma análise técnica e econômica mais consistente. A proposta do autor é analisar os fluxos de caixa de diversas alternativas de gerenciamento do ciclo de vida de um transformador de força, considerando os custos operacionais, de manutenção e de investimento, a receita com a venda de energia elétrica, a penalização por indisponibilidade do equipamento, a depreciação e os impostos, trazidos a valor presente.

Para a tomada de decisão, o modelo utiliza o método do Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido, sendo que os desempenhos técnicos das alternativas concorrentes são traduzidos economicamente, o que fornece um maior subsídio para a tomada de decisão. O modelo foi aplicado a uma subestação de 230/115 kV, com transformador de 150 MVA transmitindo potência média de 100 MW. Como resultado, o modelo forneceu a alternativa de gerenciamento de ativos de maior valor presente e em que estágio do horizonte tal alternativa deveria ser implementada.

Arshad, Islam e Khaliq (2004) apresentaram um modelo para o qual o custo total do ciclo de vida de um equipamento, utilizado para a avaliação de estratégias alternativas de GA, é composto pelos custos de manutenção, recondicionamento, reforço e monitoramento da condição. O modelo proposto é baseado na Manutenção Baseada na Condição, que relaciona as ações de gerenciamento a serem adotadas, aos resultados do monitoramento, dos testes e do diagnóstico, focando tais ações nos componentes críticos do equipamento ou do sistema.

Anders e Endrenyi (2005) propuseram um modelo e um *software* associado, para avaliar os custos do ciclo de vida de um sistema, estrutura ou componente, submetido à diversas políticas de manutenção, com o objetivo de identificar a alternativa que minimiza tais custos, compostos pelos custos de reparo, manutenção, perda de produção e pelos prejuízos resultantes do não suprimento. Esse modelo tem como principais características, a modelagem probabilística das variáveis envolvidas e a utilização do método de simulação *Monte Carlo*,

para a obtenção do valor médio e da distribuição dos custos totais, ao longo de um período de análise, para cada alternativa analisada.

2.8 Conclusões

O Gerenciamento de Ativos é uma atividade estratégica que deve estar em sintonia com a missão das empresas, devendo contribuir para a eliminação de gastos desnecessários com a manutenção, substituição e aquisição de equipamentos. Diversos autores defendem a substituição das políticas de manutenção tradicionais por atividades mais eficazes que resultem no aumento da confiabilidade dos ativos e do sistema como um todo, a um mínimo custo, permitindo a implementação de planos flexíveis, tanto do ponto de vista de distribuição das atividades ao longo do tempo (intervalos entre manutenções), como do ponto de vista da definição de que atividades executar (manutenção mais ou menos efetiva).

Com relação à complexidade do Gerenciamento de Ativos, destaca-se que o problema deve considerar inúmeras variáveis com características distintas e que deve ser tratado como um processo contínuo, acompanhando todo o ciclo de vida dos equipamentos. As informações necessárias são de caráter técnico, econômico, ambiental e social e as decisões são tomadas em nível de componentes, sistema e empresa, o que requer o envolvimento de especialistas de diversas áreas de conhecimento.

As atividades de manutenção devem estar associadas ao acompanhamento das condições de operação dos ativos, o que requer o suporte de instrumentação adequada e de ferramentas matemáticas e computacionais, além do estabelecimento de um elo quantitativo entre manutenção e confiabilidade. Adicionalmente, o caráter estocástico de algumas variáveis requer uma avaliação dos riscos de não suprimento de energia elétrica.

Cada uma das soluções alternativas deve ser analisada sob o ponto de vista de custos e benefícios para as empresas, atendimento aos requisitos impostos pelos consumidores e

agentes reguladores, impactos ambientais e sociais, dando ao GA características de um problema multicritério. A tomada de decisão não se limita apenas à definição de um plano de manutenção, com atividades que minimizem o custo, mas sim a toda uma estratégia que considere a aquisição de novos equipamentos e a substituição de equipamentos já existentes.

Por fim, observa-se que os modelos propostos para o Gerenciamento de Ativos no setor elétrico contemplam aspectos tais como a minimização da indisponibilidade, o efeito da manutenção sobre a confiabilidade e a extensão da vida útil dos equipamentos, a minimização dos custos e das penalidades devido às saídas programadas e não programadas e a maximização da receita e do lucro com a prestação do serviço. Cada um dos modelos citados considera uma abordagem probabilística para os tempos em operação e de reparo, bem como para o envelhecimento do equipamento em análise e demais variáveis de caráter aleatório.

3

METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

3.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo a metodologia que serviu de base, no trabalho proposto, para o tratamento do Gerenciamento de Ativos via abordagem multicritério, possibilitando a consideração de diversos aspectos, na avaliação de ações alternativas para o gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força.

São pressupostos básicos dessa metodologia de apoio à decisão:

- considerar que o problema da tomada de decisão pode ser caracterizado como uma situação complexa, necessitando ser devidamente estruturado;
- permitir a participação, na estruturação do problema, dos diversos indivíduos envolvidos de forma direta ou indireta no processo de tomada de decisão;
- considerar os mais diversos aspectos inerentes ao problema em análise, quando da avaliação de alternativas para a solução do mesmo, sendo esses aspectos originados da forma como cada indivíduo envolvido enxerga a situação.

3.2 A Tomada de Decisão como uma Situação Complexa

As decisões em um ambiente empresarial apresentam caráter crítico e um problema de tomada de decisão é visto como uma situação complexa, apresentando as seguintes características (Churchill, 1990):

- envolvem incertezas sobre objetivos e sobre as alternativas de ação para o alcance desses objetivos;
- envolvem incertezas sobre os indivíduos envolvidos na tomada de decisão;
- existem valores e objetivos conflitantes, bem como diferentes relações de poder entre esses indivíduos;
- existem múltiplos critérios, inicialmente não muito claros, a serem considerados na avaliação das alternativas de ação;
- existe quantidade significativa de informações, qualitativas e quantitativas, a serem consideradas e que usualmente são incompletas;
- exigem criatividade e às vezes ineditismo para a geração de soluções.

Em uma situação complexa, as incertezas quanto aos objetivos a serem alcançados levam às incertezas quanto aos aspectos a serem considerados na avaliação das alternativas de solução. O processo de estruturação do problema, deve passar então por uma fase de definição clara de objetivos, para buscar a consolidação dos aspectos de avaliação relevantes.

3.3 Os Paradigmas Científicos

Um paradigma científico serve para tornar legítimos os problemas e métodos de uma determinada área de pesquisa. Em outras palavras, trata-se de um conjunto de regras que definem o que é válido e o que não é válido realizar, quais métodos podem ser utilizados, quais problemas podem ser resolvidos, qual o objetivo a ser alcançado, como lidar com as informações e com os indivíduos responsáveis pela tomada de decisão.

A seguir, de acordo com o apresentado em Bana e Costa (1993a), faz-se uma comparação entre o paradigma Racionalista, que orienta os métodos tradicionais da Pesquisa Operacional e o paradigma Construtivista, que irá servir como base para a estruturação do problema de Gerenciamento de Ativos, conforme proposto nesse trabalho.

3.3.1 O Paradigma Racionalista

O paradigma Racionalista serve como base para a aplicação dos métodos da Pesquisa Operacional tradicional (PO), que buscam a obtenção da solução ótima para problemas considerados bem estruturados, ou seja, que podem facilmente ser formulados matematicamente. Nesses casos, busca-se a modelagem de um problema aceito por todos como aquele a ser resolvido, chamado por Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001) de problema real e o modelo construído será tanto mais adequado, quanto mais representar a realidade, evitando-se simplificações que possam comprometer a solução desse problema.

A consideração de um problema que representa a realidade vista por todos, como o problema a ser resolvido, ou seja, para o qual se desconsidere os aspectos subjetivos (forma particular como cada um enxerga o problema), tem como exigência a necessidade de que os indivíduos envolvidos sejam racionais, ou seja, que possuam o mesmo nível e tipo de conhecimento, raciocinem da mesma forma lógica, percebam as mesmas informações e persigam os mesmos objetivos. São exemplos clássicos de problemas que seguem o paradigma

Racionalista, a minimização de custos e a maximização de lucros.

Na Figura 3.1, ilustra-se o processo de definição do problema a ser resolvido, contextualizado para o GA, segundo o paradigma Racionalista.

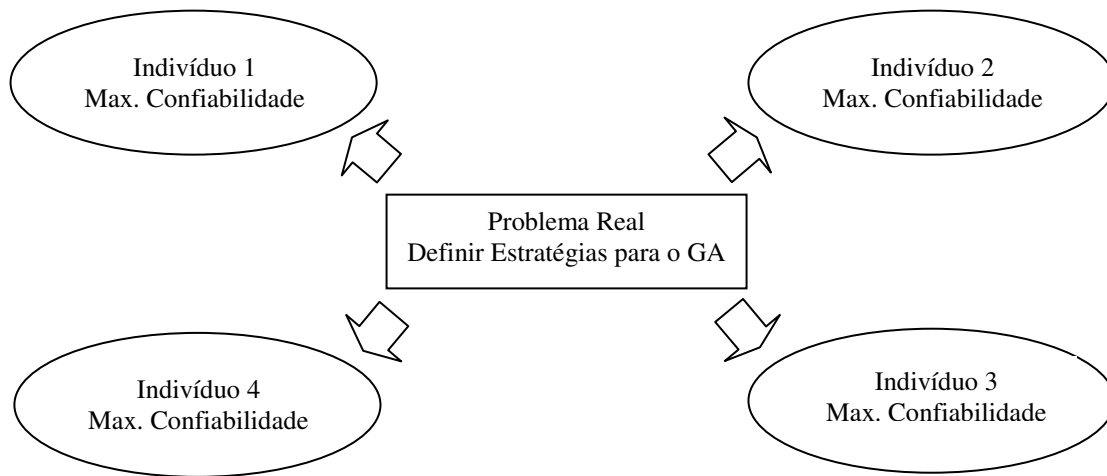


Figura 3.1 – Identificação do problema a ser resolvido – Paradigma Racionalista. Adaptada de Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001).

Observa-se na Figura 3.1 que todos os indivíduos envolvidos, guiados pela racionalidade, enxergam um único problema a ser resolvido: “A definição de uma estratégia de Gerenciamento de Ativos que maximize a confiabilidade”. Sendo geralmente definidos como problemas de minimização ou de maximização, busca-se sempre a obtenção da solução ótima que é prescritiva, ou seja, tal solução deve orientar a tomada de decisão, para que se atenda aos princípios da racionalidade.

3.3.2 O Paradigma Construtivista e a Consideração do Subjetivismo

Os seguidores do paradigma Construtivista consideram que o problema a ser resolvido é caracterizado como uma situação complexa e na etapa de estruturação desse problema,

devem ser considerados os aspectos subjetivos dos indivíduos envolvidos, ou seja, desconsidera-se a racionalidade que sustenta a Pesquisa Operacional tradicional. O subjetivismo aparece na forma como cada indivíduo apresenta seus valores e objetivos, já que cada um enxerga o problema de forma particular, não podendo ser desconsiderado, uma vez que, segundo Bana e Costa (1995) a tomada de decisão é praticada por seres humanos, com base em seus valores inerentemente subjetivos e um indivíduo só terá condições de julgar soluções alternativas para um determinado problema, se seus objetivos estiverem bem definidos.

Desse modo, a partir de um problema real, cada indivíduo constrói mentalmente um problema próprio, com base em seus valores e objetivos. Na tomada de decisão em grupo, esse fato exige a construção de um problema comum, de difícil modelagem matemática, que apresente uma solução de compromisso entre os diversos objetivos, muitas vezes conflitantes, a serem alcançados, o que direciona o processo para o apoio à decisão, ao contrário da Pesquisa Operacional, sustentada no paradigma Racionalista, que busca a tomada de decisão.

O processo de construção de um problema comum deve resultar em um modelo considerado útil pelos indivíduos envolvidos e que, em uma fase inicial de aprendizado, possibilite uma melhor compreensão do problema formulado por cada um (geração de conhecimento), ou seja, que aspectos cada um considera importantes e que alternativas de solução devem ser avaliadas, além de permitir a consolidação das suas preferências. A combinação dos problemas individuais representa uma forma mais abrangente de compreensão do problema que se quer resolver, permitindo a integração de diversas áreas, o que não poderia ser obtido no caso de um único indivíduo participante. A partir desse ponto a busca de uma solução deve ser fundamentada na observação dos efeitos de cada alternativa nos aspectos relevantes, não sendo caracterizada como a solução ótima e sim como um conjunto de recomendações que sirvam de apoio à tomada de decisão, visando o atendimento dos valores e objetivos de todos.

Na Figura 3.2, como forma de ilustrar a diferença básica entre os paradigmas apresentados, ilustra-se o processo de construção dos problemas de diversos indivíduos, a partir do problema real. Nesse exemplo, inserido no contexto do Gerenciamento de Ativos, cada indivíduo enxerga o gerenciamento do ciclo de vida de um equipamento, como um meio de solucionar um problema em particular.

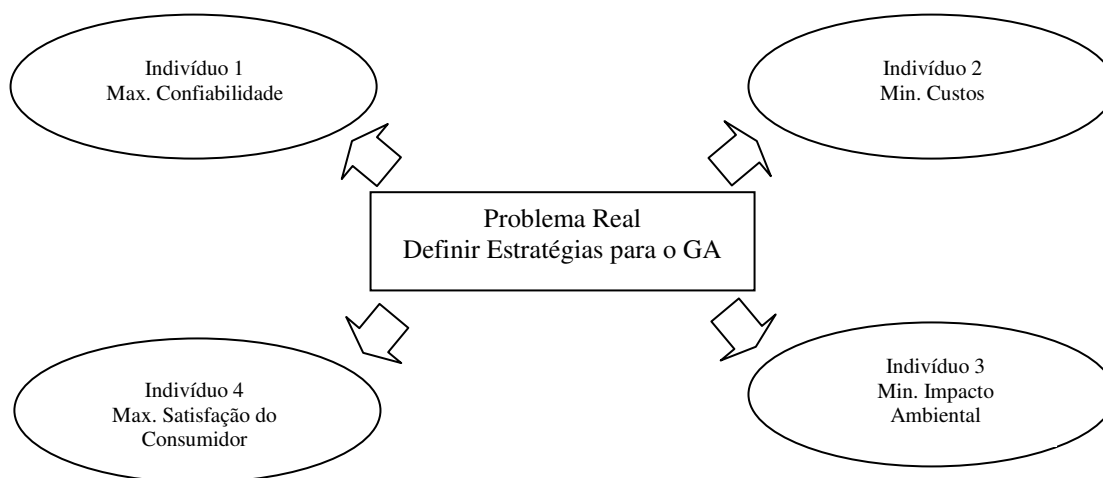


Figura 3.2 - Identificação dos problemas individuais – Paradigma Construtivista. Adaptada de Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001).

3.4 O Apoio à Decisão

Conforme abordado na Subseção 3.3.2, busca-se nesse trabalho explorar o subjetivismo, dando aos indivíduos participantes do processo de busca de soluções para o Gerenciamento de Ativos, a oportunidade de apresentar seus valores e objetivos. A adoção do paradigma Construtivista determina que a tomada de decisão deve ser de responsabilidade desses indivíduos e qualquer metodologia que siga tal orientação, deve servir de apoio à decisão.

Procura-se nas subseções seguintes, definir o apoio à decisão, como forma de tornar

claros alguns dos pressupostos que orientam esse trabalho. Nesse ponto, se vai ao encontro do que defende Bana e Costa (1993b), que coloca o construtivismo como a direção mais adequada a ser seguida por metodologias de apoio à decisão.

3.4.1 Os Indivíduos Envolvidos no Processo de Apoio à Decisão

Os indivíduos envolvidos em um processo de apoio à decisão são chamados de **atores**, sendo classificados de acordo com a sua atuação no processo, conforme a seguir.

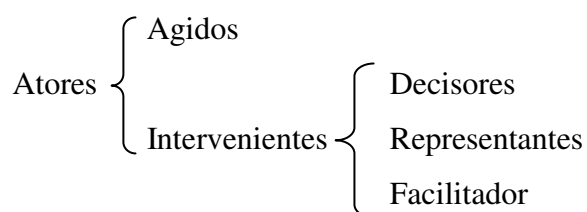


Figura 3.3 – Participantes do processo de apoio à decisão.
Fonte: Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001).

De acordo com a subdivisão acima, **agidos** são os indivíduos que não participam de forma direta da tomada de decisão, mas exercem alguma influência e sofrem alguma consequência das decisões tomadas. Já os **intervenientes** atuam de forma direta no processo decisório, fazendo prevalecer seus valores e objetivos. O grupo dos intervenientes é composto pelos **decisores**, que detêm o poder de decisão, pelos **representantes**, indivíduos indicados pelos decisores para representá-los e pelo **facilitador**, indivíduo especialista em apoio à decisão, cuja função é facilitar e apoiar o processo de tomada de decisão, sendo responsável pela coordenação da construção do problema, utilizando para isso, ferramentas adequadas.

Cabe ao facilitador, permitir que os demais atores clarifiquem valores, objetivos e preferências, até o ponto em que seja viável uma tomada de decisão consistente.

3.4.2 Definição e Etapas do Processo de Apoio à Decisão

Roy (1993) define o apoio à decisão como uma atividade coordenada de forma científica, por um facilitador, para a obtenção de respostas às questões apresentadas pelos decisores em um processo decisório. Com base no que diz Bana e Costa (1993b), pode-se adicionalmente afirmar que o apoio à decisão pode ser visto como um processo de interação com uma situação complexa, onde os atores, com seus valores e as ações alternativas para a solução do problema se relacionam para a identificação de objetivos a serem alcançados e de características ou atributos das ações a serem avaliadas, conforme Figura 3.4.

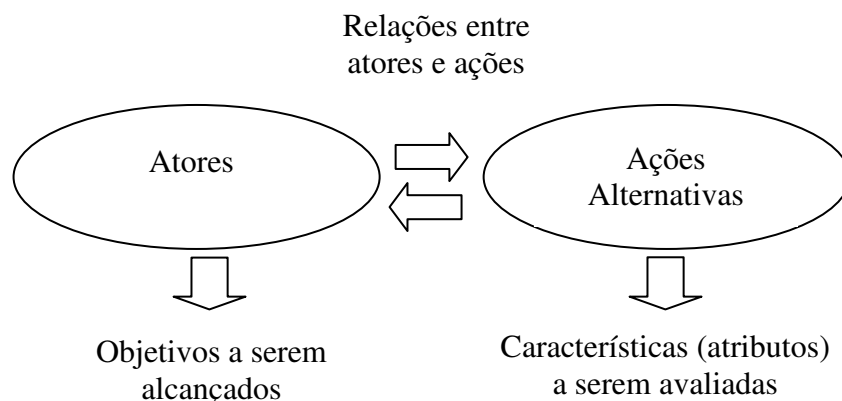


Figura 3.4 – Relacionamento entre atores e ações em um processo de apoio à decisão.
Fonte: Bana e Costa (1993b).

O apoio à decisão deve ser conduzido por meio da execução das seguintes etapas:

- 1º) identificação do contexto decisório;
- 2º) estruturação do problema;
- 3º) estruturação do modelo multicritério;
- 4º) avaliação das ações alternativas.

Na seção seguinte, o processo de apoio à decisão é descrito, por meio de uma

metodologia que vem sendo aplicada na solução de diversos tipos de problemas.

3.5 Metodologia Clássica para o Apoio à Decisão

A fundamentação teórica dessa metodologia é apresentada em Montibeller Neto (1996), que mostra sua aplicação em uma situação prática de avaliação da qualidade de vida nas organizações, e em Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001), em que é aplicada a uma situação fictícia. Bana e Costa *et al.* (1999), aplicaram essa metodologia para a criação de estratégias para aumentar a qualidade e a competitividade nas indústrias têxteis do Estado de Santa Catarina e em Lúcio e Teive (2006) e Lúcio e Teive (2007a) agrega-se a mesma à técnica de sistemas especialistas, como forma de aplicação no contexto do Gerenciamento de Ativos no setor elétrico. Na Figura 3.5 procura-se ilustrar todo o processo de apoio à decisão, levado a efeito por meio da aplicação da metodologia clássica.

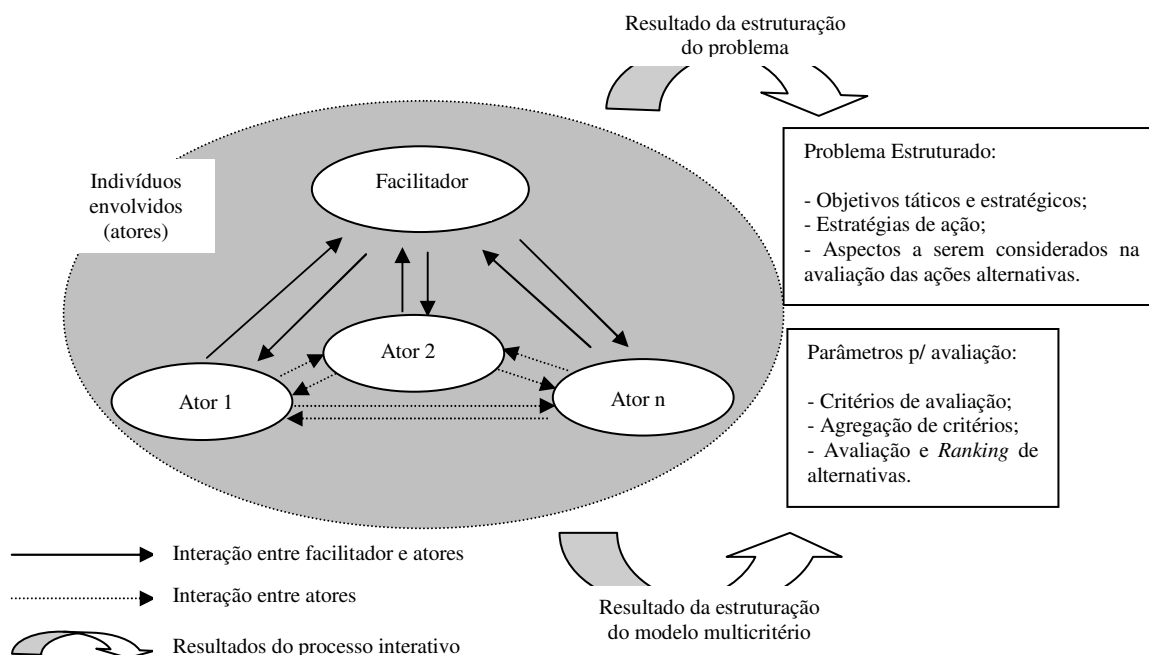


Figura 3.5 – Representação esquemática do processo de apoio à decisão.

Na Figura 3.5, n atores (decisores, representantes ou agidos), sob a coordenação do facilitador, participam de um processo iterativo, no sentido de produzir como resultados, o problema em análise devidamente estruturado e a forma como as diversas ações alternativas serão avaliadas. Nas subseções seguintes são descritas cada uma das etapas de aplicação da metodologia clássica, conforme listadas na Subseção 3.4.2.

3.5.1 Identificação do Contexto Decisório

Esta etapa do processo de apoio à decisão, diz respeito à definição dos seguintes pontos:

a) Identificação dos atores

Sabe-se que em um ambiente corporativo existem diversos indivíduos envolvidos com a tomada de decisão, com diversos níveis de atuação. Seguindo as definições vistas na Subseção 3.4.1, cabe ao facilitador identificar o conjunto de atores, até mesmo do ambiente externo à empresa e classificá-los como decisores, representantes ou agidos, bem como definir o grau de importância de cada um dentro do processo de apoio à decisão, a partir dos níveis de interesse e de poder com relação à tomada de decisão.

b) Identificação das Ações

Roy (1996) define ação como uma representação de uma possível contribuição à decisão. No caso específico do Gerenciamento de Ativos, as ações referem-se à compra de um equipamento novo, a todas as atividades de manutenção e à substituição de um equipamento ao final da vida útil.

No Gerenciamento de Ativos, adotam-se na realidade, combinações das ações listadas

anteriormente. Nesse caso, a partir desse ponto, ações de Gerenciamento de Ativos passam a ser consideradas como estratégias de ação, cobrindo todo o período de utilização de um equipamento.

c) Definição da Problemática de Referência

A definição da problemática de referência está diretamente associada ao tipo de resultado que os decisores desejam obter com o apoio à decisão e define o procedimento a ser adotado para a avaliação das estratégias de ação. Diante das estratégias de ação, os decisores podem estar interessados em (Roy, 1996): 1º) descrever as estratégias de ação e suas características; 2º) classificar as estratégias de ação em categorias; 3º) ordenar as ações em termos de preferência; 4º) rejeitar estratégias de ação.

3.5.2 Estruturação do Problema - Mapas Causais e Pontos de Vista Fundamentais

Bana e Costa (1995) fala da estruturação de problemas inicialmente mal estruturados, destacando a importância de se buscar explicitar a visão que cada ator tem sobre o problema, para que posteriormente, sob a coordenação do facilitador, seja construído um problema único, possibilitando a obtenção de soluções que levem em conta aspectos e ações considerados relevantes por todos. Considera-se como resultados esperados da etapa de estruturação do problema:

- a geração de conhecimento sobre o problema em análise;
- a construção de um modelo global, aceito por todos os atores para apoiar a decisão;
- a consolidação de objetivos a serem alcançados;
- a geração de estratégias de ação alternativas;
- a definição de uma base para a avaliação e comparação de estratégias de ação.

a) Mapas Causais

A metodologia clássica utiliza a técnica de mapas cognitivos causais, ou simplesmente mapas causais⁶, concebida por Robert Axelrod (Axelrod, 1976), como uma forma sistemática de estruturar um problema inicialmente mal estruturado. Segundo Eden (1988), os mapas causais devem representar relações de causa-efeito entre conceitos considerados relevantes por cada ator, no contexto do problema em análise. Os conceitos de um mapa causal apresentam como conteúdo, um primeiro pólo, que representa a idéia inicial associada ao conceito apresentado e um pólo oposto, que representa a idéia contrária a do primeiro pólo, conforme exemplo mostrado na Figura 3.6, específico para o Gerenciamento de Ativos, em que os pólos são separados por “...”, que significa “ao invés de”.

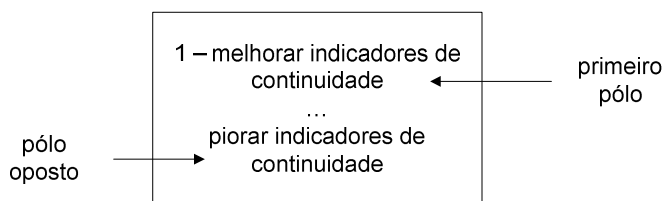


Figura 3.6 - Primeiro pólo e pólo oposto de um conceito.

A presença do pólo oposto é importante, já que pode oferecer uma alternativa ao que o ator está propondo inicialmente. Por exemplo, no contexto do Gerenciamento de Ativos, na situação mostrada na Figura 3.7, a seguir, o conceito 1 aparece como um meio para o alcance do conceito 3 e talvez se o pólo oposto desse conceito (“reduzir custo de manutenção preventiva”) não tivesse sido gerado, o ator não tivesse condições de gerar o conceito 2, também como um meio para a redução do custo de manutenção preventiva.

Ainda com relação à Figura 3.7, observa-se um sinal negativo ao lado da ligação entre

⁶ Existem controvérsias quanto à utilização do termo “mapa cognitivo” e por esse motivo, será utilizado nesse texto o termo “mapa causal”.

os conceitos 2 e 3, o que indica que a relação de causa-efeito representada por essa ligação se dá de forma cruzada, ou seja, na realidade, “reprogramar equipes de manutenção” (primeiro pólo do conceito 2) é um meio para “reduzir custo de manutenção preventiva” (pólo oposto do conceito 3).

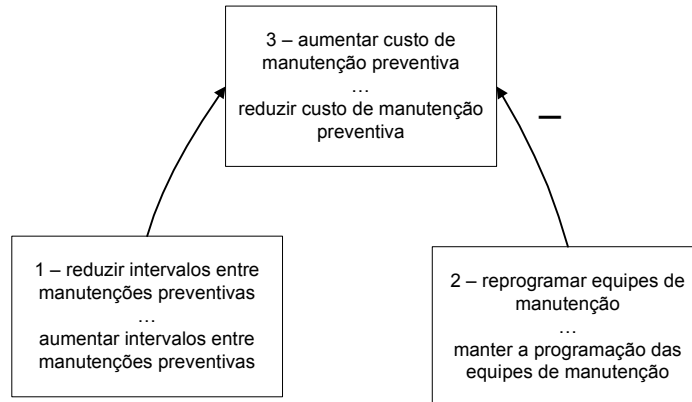


Figura 3.7 - Importância da definição do pólo oposto.

A construção de um mapa causal ocorre a partir de um processo iterativo no qual, a partir de conceitos iniciais, cada ator deve responder a perguntas do tipo “**por que este conceito é importante ?**” e “**como este conceito pode ser alcançado ?**”, formuladas pelo facilitador, que ao receber as respostas, vai incluindo-as no mapa, na forma de novos conceitos. Observa-se que a expansão do mapa no sentido “meio-fim” define objetivos e a expansão no sentido “fim-meio” define ações. Ao final, tem-se uma estrutura hierarquizada onde os conceitos de níveis inferiores são ações alternativas e os de níveis superiores são objetivos a serem alcançados.

Na busca da estruturação de um problema único, cabe ao facilitador coordenar um processo de negociação entre os atores, visando a obtenção de um mapa congregado. A obtenção do mapa congregado vai ao encontro da idéia de que nas decisões em grupo, a definição do problema a ser resolvido deve ser negociada. Esse processo de obtenção do mapa congregado deve buscar a identificação de similaridades entre conceitos de mapas individuais,

para compor um único conceito no mapa congregado resultante e de relações de causa-efeito entre conceitos de mapas individuais, adicionando novas ligações ao mapa congregado.

Um exemplo de construção de um mapa congregado é mostrado na Figura 3.8. O mapa congregado foi obtido pela similaridade entre os conceitos 3 e 9 dos mapas dos atores A e B e pela inclusão das ligações entre os conceitos 1-12 (1 causa 12) e 11-6 (11 causa 6).

Tomando-se como referência o mapa do ator A, o conceito 9 do mapa do ator B foi retirado e todas as ligações desse conceito foram transferidas para o conceito 3 do mapa do ator A, fazendo surgir as ligações 7-3 e 3-10, representando as ligações originais 7-9 e 9-10.

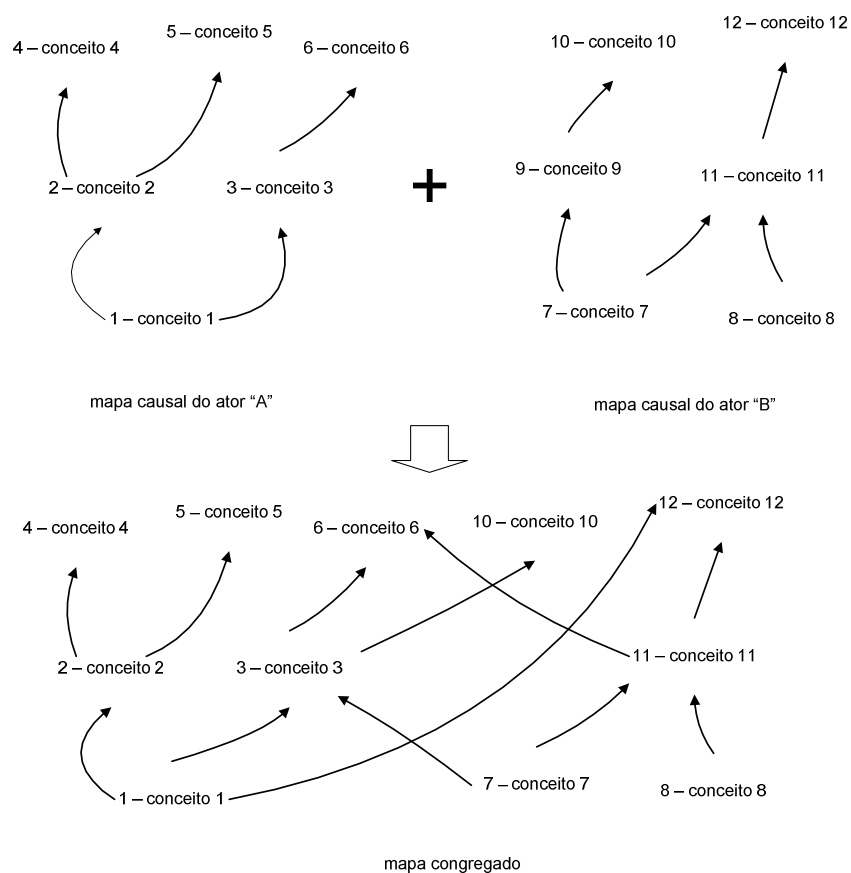


Figura 3.8 – Obtenção de um mapa causal congregado.

b) Pontos de Vista Fundamentais

Um Ponto de Vista Fundamental (PVF) corresponde a um aspecto a ser considerado na avaliação das estratégias de ação, sendo identificado no mapa congregado, como um conceito essencial ao alcance dos objetivos estratégicos da empresa (essenciabilidade) e que tem como causa unicamente as ações alternativas que estão sendo consideradas (controlabilidade), ou seja, é um conceito intermediário entre ações e objetivos.

A análise da essenciabilidade e da controlabilidade deve ser realizada pelos atores, sob a coordenação do facilitador e serve para definir um conjunto de conceitos do mapa congregado, candidatos a PVFs. Cada conceito classificado como candidato a PVF, deverá apresentar as propriedades listadas no Quadro 3.1, incluindo a essenciabilidade e a controlabilidade, para poder ser considerado um PVF.

Propriedade	Descrição
Essencial	Deve representar um aspecto de fundamental importância para os atores.
Controlável	Deve representar um aspecto que seja influenciado exclusivamente por ações de GA.
Mensurável	Deve permitir especificar, com o mínimo de ambiguidade os desempenhos das estratégias de ação.
Operacional	Deve permitir a coleta das informações necessárias para a determinação dos desempenhos das estratégias de ação, dentro do tempo disponível e com esforço admissível.
Isolável	Deve permitir a análise de um aspecto considerado relevante, independentemente dos demais aspectos.
Compreensível	Deve apresentar significado claro para os atores.

Quadro 3.1 – Propriedades dos pontos de vista fundamentais.

Fonte: Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001).

Além disso, algumas propriedades são também necessárias para o conjunto de pontos de vista como um todo, sendo mostradas no Quadro 3.2.

Propriedade	Descrição
Completo	Deve incluir todos os aspectos considerados fundamentais pelos atores.
Não-redundante	Não deve levar em conta um mesmo aspecto mais de uma vez.
Conciso	O número de aspectos deve ser o mínimo necessário para uma avaliação adequada, segundo a visão dos atores.

Quadro 3.2 – Propriedades do conjunto de pontos de vista fundamentais.
Fonte: Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001).

Os PVFs assim definidos deverão compor uma estrutura arborescente como a mostrada na Figura 3.9 e que irá orientar o processo de avaliação, ou seja cada uma das estratégias de ação alternativas deverá ser avaliada em critérios que representem cada um dos pontos de vista componentes da árvore. Observa-se que os pontos de vista PVF_1 e PVF_3 , foram decompostos nos Pontos de Vista Elementares PVE_{11} , PVE_{12} e PVE_{31} , PVE_{32} , respectivamente. A decomposição de um PVF em vários PVEs pode ser necessária para permitir uma avaliação mais precisa do aspecto que está sendo considerado.

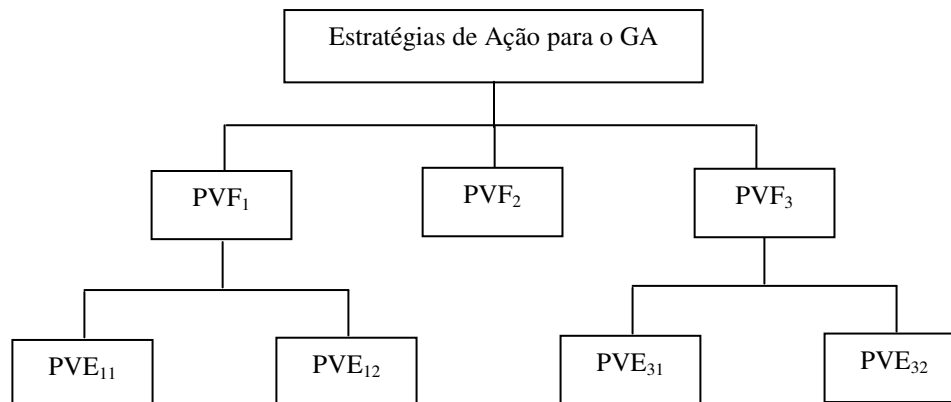


Figura 3.9 – Árvore de PVFs e PVEs.

3.5.3 Estruturação do Modelo Multicritério - Avaliação Local e Global de Alternativas

Essa etapa do apoio à decisão, segundo a metodologia clássica, corresponde à

avaliação das estratégias de ação alternativas, considerando os aspectos representados na árvore de pontos de vista, conforme subseção anterior. A estruturação do modelo multicritério corresponde à criação de uma ferramenta de avaliação para comparar alternativas definidas na etapa de estruturação do problema, devendo-se levar em conta os objetivos e preferências dos atores, quando da atribuição do grau de importância de cada aspecto a ser considerado e da definição de um critério para a avaliação em cada um desses aspectos.

De acordo com a metodologia clássica, deve-se efetuar inicialmente a avaliação local das estratégias de ação, ou seja, em cada aspecto considerado relevante. Tal avaliação pode gerar como resultados: a identificação dos pontos fortes e fracos de cada estratégia; as possibilidades de melhoria de desempenho e a geração de novas estratégias de ação, além de servir como subsídio para a avaliação global. O passo seguinte na estruturação do modelo multicritério diz respeito à definição da forma como tais aspectos serão agregados, visando a avaliação global e isso é feito a partir da definição de uma função de agregação, do tipo, por exemplo, soma ponderada, conforme é apresentado na Equação 3.1.

$$V_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot w_j \quad (3.1)$$

Em que:

V_i - Desempenho global da estratégia de ação i ;

v_{ij} - Desempenho local (pontuação) da estratégia de ação i no PVF j ;

w_j - Taxa de substituição (peso) do PVF j ;

n - Número de pontos de vista considerados.

De acordo com a Equação 3.1, uma estratégia de ação i estará em uma posição superior com relação a uma estratégia k , se $V_i > V_k$, ou seja, a ação i é preferível à ação k , dado um conjunto de pontos de vista, caracterizados pelos respectivos descritores. A seguir são descritos os procedimentos para a obtenção da pontuação v_{ij} e das taxas de substituição w_j .

a) Definição dos Desempenhos Locais – Descritores e Níveis de Impacto

Um descritor estabelece como cada estratégia de ação será avaliada em determinado PVF, ou seja, de que forma o desempenho dessas estratégias será quantificado. Por exemplo, no contexto do Gerenciamento de Ativos, para o PVF “custo de manutenção preventiva”, pode-se definir o descritor “valor presente dos custos totais de manutenção preventiva ao longo do período de operação do equipamento”. Após a definição do descritor, deve-se estabelecer um conjunto de níveis de impacto, correspondentes à ordenação dos desempenhos plausíveis no aspecto que está sendo considerado. Por exemplo, para o descritor associado ao PVF “custo de manutenção preventiva”, os seguintes níveis de impacto poderão ser definidos, conforme exemplo da Figura 3.10.

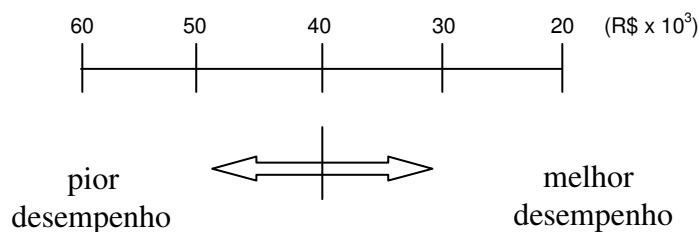


Figura 3.10 - Níveis de impacto para o PVF “custo de manutenção preventiva”.

Nesse exemplo, conforme Figura 3.10, define-se como melhor desempenho, o custo de R\$ 20.000,00. Em contrapartida, o pior desempenho seria correspondente a um custo de manutenção de R\$ 60.000,00. No entanto, para outros pontos de vista, como por exemplo “receita com a venda de energia elétrica”, os melhores desempenhos referem-se às estratégias com maiores níveis de impacto (maiores valores numéricos). Surge a necessidade de se estabelecer uma escala única de medição para os desempenhos locais, ou seja, para a determinação dos parâmetros v_{ij} da Equação 3.1, o que é feito a partir da definição das funções de valor.

b) Definição das Funções de Valor

Para resolver a situação de conflito associada à avaliação das estratégias de ação nos aspectos considerados, utilizam-se funções de valor, que permitem que essa avaliação seja efetuada em uma escala comum e que decisores e agidos possam explicitar suas preferências quanto à pontuação dos níveis de impacto definidos para cada PVF. Uma estratégia de ação receberá uma pontuação maior ou menor, conforme o desempenho apresentado, sendo que o melhor nível de impacto recebe pontuação máxima e o pior nível de impacto recebe pontuação mínima. Níveis intermediários recebem pontuação intermediária, conforme as diferenças de atratividade apontadas pelos atores.

A seguir, apresentam-se dois métodos para a definição das funções de valor, ambos tendo como base, a definição dos descritores e dos níveis de impacto para cada PVF.

b.1) Método da Pontuação Direta (*Direct Rating*)

Segundo Watson e Buede (1987), trata-se de um dos métodos mais utilizados para a construção de funções de valor, para o qual as diferenças de atratividade entre níveis de impacto é definida de forma quantitativa. Para esse método, o melhor e o pior nível de impacto (âncoras) recebem pontuação máxima (em geral “100”) e mínima (em geral “0”), respectivamente e em seguida, a pontuação dos níveis de impacto intermediários é definida pela avaliação direta em relação aos níveis âncoras. No caso do PVF “custo de manutenção preventiva”, um exemplo de julgamento efetuado por um ator, com a função de valor resultante é mostrado na Figura 3.11.

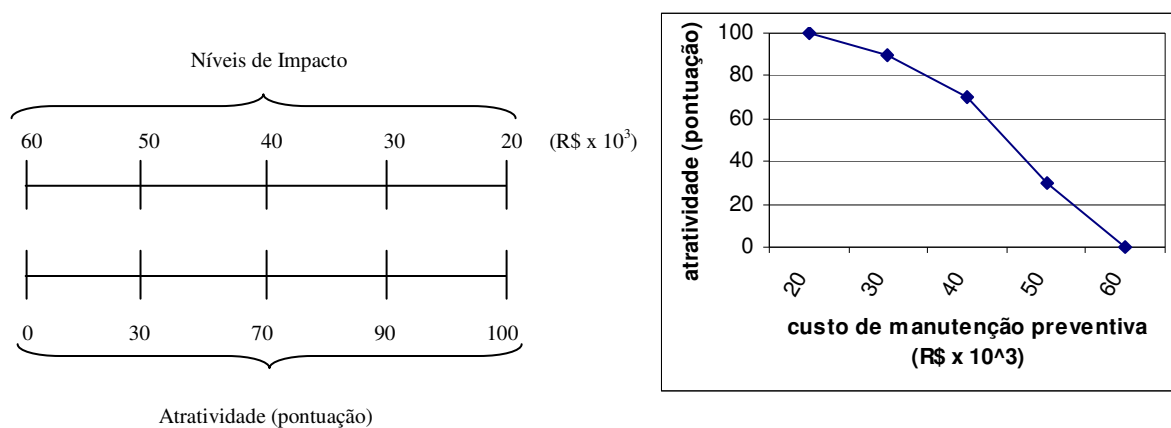


Figura 3.11 – Função de valor - Método da Pontuação Direta.

Conforme a Figura 3.11, o ator julgou que a diferença de atratividade entre os níveis de impacto “20” (custo de manutenção igual a R\$ 20.000,00) e “30” (custo de manutenção igual a R\$ 30.000,00) é de 10 pontos (100 pontos – 90 pontos) e que entre os níveis “20” e “40” (custo de manutenção igual a R\$ 40.000,00) é de 30 pontos (100 pontos – 70 pontos). Uma estratégia de ação i que apresentar um custo de manutenção preventiva de R\$ 50.000,00, sendo este o j -ésimo ponto de vista, receberá uma pontuação: $v_{ij} = 30$; sendo esse o valor a ser utilizado para a avaliação global desta estratégia, conforme Equação 3.1.

Esse método apresenta como principais vantagens, a rapidez e a simplicidade na obtenção da pontuação e a ausência de transformações matemáticas que possam afetar a credibilidade dos resultados, ou seja, os julgamentos numéricos efetuados e que resultam nas pontuações atribuídas a cada nível de impacto, são diretamente utilizadas como parâmetros v_{ij} na Equação 3.1.

b.2) Método do Julgamento Semântico

No julgamento semântico emprega-se a avaliação qualitativa da diferença de atratividade entre dois níveis de impacto. Uma das técnicas que aplica tal procedimento é a *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* – MACBETH (Bana e Costa & Vansnick, 1995), na qual o julgamento de diferença de atratividade entre dois níveis de impacto é efetuado de forma qualitativa, utilizando-se as categorias semânticas a seguir.

C ₀ – Nenhuma diferença de atratividade.	C ₄ – Diferença de atratividade forte .
C ₁ – Diferença de atratividade muito fraca .	C ₅ – Diferença de atratividade muito forte .
C ₂ – Diferença de atratividade fraca .	C ₆ – Diferença de atratividade extrema .
C ₃ – Diferença de atratividade moderada .	

Um exemplo de julgamento semântico no ambiente MACBETH (Bana e Costa, De Corte e Vansnick, 2005), é mostrado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Planilha para o julgamento semântico – Programa MACBETH.

Observa-se, conforme linha 4 e coluna 5 dessa planilha, uma maior diferença de

atratividade entre os níveis de impacto “50” e “60” (forte), se comparada com a diferença de atratividade entre os níveis “30” e “40” (fraca), conforme linha 2 e coluna 3. Os níveis de impacto “20” e “60” receberam pontuação máxima (100 pontos) e mínima (pontuação nula), respectivamente, por corresponderem ao melhor e ao pior desempenho possíveis. Na mesma planilha (coluna “Escala atual”) aparecem as pontuações geradas pelo programa para cada nível de impacto, de acordo com os julgamentos realizados e em Bana e Costa e Vansnick (1995), são detalhados os procedimentos que convertem os julgamentos semânticos em pontuação. Na Figura 3.13 ilustra-se a função de valor obtida via programa MACBETH.

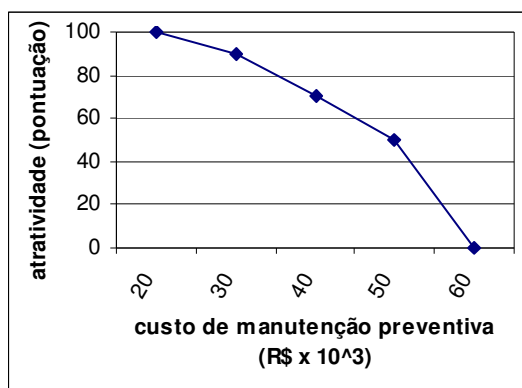


Figura 3.13 - Função de valor – Método MACBETH.

Considera-se como vantagem desse método o fato de que os julgamentos efetuados pelo ator estão de acordo com a forma de raciocínio empregada por seres humanos (Larichev *et al.*, 1995) e (Larichev e Brown, 2000), ou seja, as preferências são expressas de uma forma mais natural, utilizando termos linguísticos, sem a necessidade de raciocínio utilizando variáveis numéricas.

c) Definição das Taxas de Substituição

As taxas de substituição w_j , da Equação 3.1, refletem o julgamento dos atores com relação ao grau de importância dos pontos de vista fundamentais.

De forma semelhante ao que foi visto para as funções de valor, a atratividade dos pontos de vista pode ser avaliada via julgamento numérico ou via julgamento semântico (qualitativo), utilizando-se o programa MACBETH. Nesse caso, após a ordenação dos PVFs em ordem decrescente de atratividade, deve-se preencher uma planilha semelhante à mostrada na Figura 3.12, utilizada para as funções de valor e com as mesmas categorias semânticas. As taxas de substituição são obtidas também via transformação matemática (Bana e Costa e Vansnick, 1995).

3.6 Críticas à Metodologia Clássica

Primeiramente, observa-se que a avaliação das ações por meio de uma função de agregação desconsidera a rica estrutura do mapa causal, quanto às relações de causa-efeito entre conceitos, bem como o fato de que esses conceitos podem representar ações (em um nível hierárquico inferior), objetivos táticos (em um nível hierárquico intermediário) e objetivos estratégicos (em um nível hierárquico superior). Acredita-se ser interessante utilizar tal estrutura para verificar o impacto das ações ou estratégias, compostas por um conjunto de ações, sobre o alcance dos objetivos táticos e estratégicos previamente definidos e até mesmo sobre o cumprimento da missão da empresa.

A avaliação via função de agregação requer que funções de valor (obtidas a partir de descritores e níveis de impacto) e taxas de substituição, sejam obtidas com precisão. Isso torna necessário que se defina a melhor forma de avaliar local e globalmente as ações

alternativas, estabelecendo os descritores e níveis de impacto mais adequados a cada ponto de vista fundamental considerado e exigindo que se tenha condições de efetuar o julgamento da atratividade de tais níveis e da ordenação de tais aspectos, de forma consistente com as preferências dos atores envolvidos. Verifica-se que limitações quanto ao raciocínio dos atores e possíveis situações de incomparabilidade entre aspectos considerados, podem comprometer a precisão na obtenção dos parâmetros que compõem a função de agregação, sob o ponto de vista numérico.

Questiona-se, de forma semelhante ao que fazem alguns autores, o fato de se considerar, conforme a metodologia clássica, os atores como fontes inesgotáveis e confiáveis de informação. Larichev *et al.* (1995) referem-se aos julgamentos numéricos característicos do método da Pontuação Direta, para a obtenção de funções de valor, afirmando que a busca pela exatidão nos julgamentos de diferença de atratividade pode levar a erros e consequentemente a soluções que não representem verdadeiramente as preferências dos atores. Os autores destacam o fato de ser mais natural ao ser humano, uma forma não exata de tornar explícitas suas preferências e a maior estabilidade dos julgamentos efetuados de forma qualitativa. Em trabalho posterior, Larichev e Brown (2000) comparando métodos numéricos com métodos verbais de decisão, afirmam serem esses últimos mais adequados a problemas onde fatores qualitativos e a incerteza estão presentes e que, no caso de processos de decisão em grupo, se pode chegar mais rápido a um consenso, no caso de conflitos, quando se usa o modo verbal de comunicação. Os dois trabalhos citados favorecem a aplicação da metodologia MACBETH para aplicação em um processo de apoio à decisão, já que em tal metodologia, os julgamentos são efetuados de forma qualitativa.

Tversky e Kahneman (1974) também analisam a questão dos julgamentos efetuados em um ambiente de incerteza, destacando o fato de que o ser humano aplica heurísticas e preconceitos, como forma de simplificar julgamentos, mas que no entanto, tal procedimento pode resultar em erros. Entende-se que as críticas feitas por Tversky e Kahneman são pertinentes, mesmo nas situações em que se aplicam métodos de julgamento qualitativo como

o MACBETH.

Por fim, Montibeller Neto (2000) observa que uma função de agregação corresponde a um agrupamento de valores instrumentais ou objetivos táticos e nada indica que a obtenção de uma solução que apresente o maior valor instrumental global, irá necessariamente atender aos valores terminais ou objetivos estratégicos. Com base no exposto nessa seção, propõe-se, como será visto no Capítulo 5, a utilização dos mapas causais e da Lógica *Fuzzy*, não somente como instrumento de reflexão, aprendizado e definição dos aspectos de avaliação para o Gerenciamento de Ativos, mas também, como instrumento para a própria avaliação qualitativa de estratégias de ação.

3.7 Conclusões

A complexidade do processo de busca de soluções para o problema de Gerenciamento de Ativos está associada principalmente à dificuldade de se construir um modelo computacional, devido aos vários aspectos envolvidos, tais como: confiabilidade, custos, impacto ambiental e satisfação de acionistas e consumidores, sendo o problema caracterizado como uma situação complexa. A Teoria Multicritério de Apoio à Decisão permite lidar com essa complexidade, sob o pressuposto de se adotar o paradigma construtivista para a estruturação do problema e do modelo de avaliação.

Os mapas causais são uma estrutura rica em informações sobre o relacionamento entre variáveis e aspectos associados ao problema. Além disso, essa técnica permite, a partir de um procedimento simples, a obtenção de um modelo comum, pela agregação dos mapas causais individuais, resultando em uma estrutura de maior dimensão, o que pode aumentar a complexidade da abordagem, mas que, no entanto, faz surgirem diversos aspectos, relacionados às diversas áreas da empresa, permitindo uma modelagem mais adequada.

A estrutura hierarquizada de ações-meios-fins pode ser utilizada para a avaliação de estratégias de ação, permitindo determinar os impactos de cada ação alternativa sobre os objetivos a serem alcançados. No capítulo seguinte, apresentam-se os sistemas especialistas *fuzzy* e os mapas causais *fuzzy*, para que se possa agregar ao processo de apoio à decisão, uma abordagem adequada aos aspectos críticos da metodologia clássica analisada nesse capítulo.

4

SISTEMAS ESPECIALISTAS, LÓGICA *FUZZY* E MAPAS CAUSAIS *FUZZY*

4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica que permitiu definir uma metodologia para o Gerenciamento de Ativos no setor elétrico, baseada no conhecimento especializado, na consideração das incertezas inerentes ao problema e na avaliação das estratégias de ação por meio da estrutura de causa-efeito entre conceitos de um mapa causal.

4.2 O Conhecimento Especializado no Gerenciamento de Ativos

Com base no conteúdo exposto nos Capítulos 2 e 3, parece evidente a necessidade da consideração do conhecimento especializado, na busca de soluções para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos nas empresas do setor elétrico, mais especificamente, no que diz respeito à avaliação das condições operativas dos mesmos, à proposição de ações coerentes com a avaliação feita e aos procedimentos para a avaliação de tais ações. Desse modo, os Sistemas Especialistas (SEs) aparecem como uma possibilidade de disponibilização de tal conhecimento, em um ambiente computacional que pode, entre outras vantagens, tornar desnecessária a presença do especialista humano, automatizando a obtenção de soluções para o problema em análise.

A fundamentação teórica dos Sistemas Especialistas pode ser encontrada em Waterman

(1986), Giarratano e Riley (1989), Scott, Clayton e Gibson (1991), onde se destacam, entre outros pontos, o enquadramento dos SEs dentro da área da Inteligência Artificial, as vantagens e desvantagens advindas da sua utilização, as fases da sua implementação, os procedimentos para a aquisição e armazenamento do conhecimento especializado e que características são desejáveis a um SE. O objetivo das próximas seções é apresentar, de forma resumida, a Lógica *Fuzzy* para o tratamento de incertezas, os Sistemas Especialistas *Fuzzy* e a teoria dos Mapas Causais *Fuzzy*.

4.3 A Lógica *Fuzzy* e o Tratamento da Incerteza

Um dos objetivos do apoio à decisão é atender aos valores e objetivos dos indivíduos participantes, direta ou indiretamente, da tomada de decisão e para isso, cabe ao facilitador aplicar ferramentas que visem clarificar tais valores e objetivos.

Sob o enfoque da metodologia clássica de apoio à decisão, apresentada no Capítulo 3, os julgamentos de diferença de atratividade entre níveis de impacto e entre pontos de vista fundamentais foram identificados como fontes de incerteza, que podem comprometer o objetivo do facilitador em fornecer soluções que atendam a valores e objetivos previamente declarados. Uma das propostas da metodologia que será apresentada no próximo capítulo é oferecer meios para o tratamento da incerteza, ao invés de simplesmente desconsiderá-la.

O que se pretende é considerar as limitações inerentes ao ser humano no que diz respeito à declaração de suas preferências e ao raciocínio necessário à elaboração dos julgamentos, principalmente nos casos em que esse raciocínio envolve variáveis numéricas. O tratamento da incerteza, incorporado a uma metodologia de apoio à decisão, deve ter como objetivo, permitir o raciocínio aproximado, utilizando variáveis linguísticas, propondo-se para isso a utilização da Lógica *Fuzzy*.

Adicionalmente, as críticas apresentadas por Lúcio e Teive (2008) aos métodos clássicos de diagnóstico das condições de operação de transformadores de força, por meio da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, justificam a proposição da consideração das incertezas inerentes às situações em que se definem intervalos com limites fixos para as variáveis envolvidas no problema. Roizman e Davydov (1999) afirmam que no diagnóstico das condições de transformadores de força, nem sempre a informação disponível é precisa e mensurável, ou seja, as vezes essa informação é vaga, incerta ou incompleta. Moreira, Santos e Vellasco (2007) apontam a complexidade dos processos que ocorrem no interior de um transformador de força como fontes de inconsistências e de dificuldades na interpretação dos resultados fornecidos, o que vai ao encontro da idéia da utilização do conhecimento especializado e da consideração das incertezas.

4.3.1 Complexidade, Credibilidade e Incerteza na Modelagem de um Problema

Conforme bem relatado por Klir e Yuan (1995) existem limites quanto ao nível de complexidade apresentado por uma situação problemática, e tais limites são definidos pela limitação da capacidade do ser humano e dos recursos computacionais disponíveis para o processamento de informações. Desse modo, deve-se buscar definir de que formas se pode lidar com problemas cuja complexidade ultrapassa tal limite de processamento.

Klir e Yuan afirmam ainda que a resolução de um problema exige a sua modelagem, para possibilitar a previsão do comportamento das variáveis envolvidas, a representação de fenômenos e o aprendizado de como controlar esses fenômenos. Na construção de um modelo deve-se maximizar sua utilidade e para isso, três aspectos básicos devem ser considerados: a complexidade do modelo, a credibilidade dos resultados e o grau de consideração das incertezas. Segundo esses autores, a incerteza desempenha papel fundamental na utilidade de um modelo, por exercer influência direta sobre os demais aspectos. Em outras palavras, um maior grau de incerteza na modelagem reduz a complexidade quanto ao raciocínio e ao processamento de informações, aumenta a credibilidade e consequentemente aumenta a

utilidade do modelo.

Os autores apontam o artigo de Lotfi A. Zadeh (Zadeh, 1965) que introduziu a teoria de Conjuntos *Fuzzy*, como um marco importante para uma mudança de paradigma: deixar de considerar a incerteza como um fator indesejável e não científico e passar a considerá-la como essencial para a ciência, permitindo ganhos nas outras características. Com o surgimento de novas teorias baseadas nessa mudança de paradigma, além da conhecida teoria de Probabilidade, que considera um tipo particular de incerteza, problemas podem ser resolvidos permitindo-se a consideração de conceitos vagos expressos em linguagem natural, bem como das incertezas relativas à quantificação de variáveis.

Apresenta-se nas seções seguintes, os conceitos da teoria de Conjuntos *Fuzzy* e da Lógica *Fuzzy*, necessários ao entendimento da metodologia proposta no Capítulo 5.

4.4 As Operações com Conjuntos *Fuzzy* e o Isomorfismo com a Lógica *Fuzzy*

Antes de entender o tratamento matemático dado às incertezas, por meio da implementação de um Sistema Especialista *Fuzzy*, é preciso conhecer as operações com conjuntos *fuzzy* e o isomorfismo⁷ existente entre tais operações e a Lógica *Fuzzy*.

Considere-se um elemento x de um conjunto universal X (por exemplo, o conjunto dos números reais), e dois conjuntos *fuzzy* A e B (subconjuntos de X), admite-se que o elemento x pode pertencer aos conjuntos A e B , com graus de pertinência definidos pelas funções de pertinência $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ e $\mu_B: X \rightarrow [0,1]$. Em outras palavras, considera-se que x é membro de A e de B , com graus de pertinência que variam dentro do intervalo fechado $[0,1]$.

⁷ O termo “isomorfo” significa “com a mesma forma”.

4.4.1 Operações com Conjuntos *Fuzzy*

As operações com conjuntos *fuzzy* correspondem a uma extensão das operações com conjuntos clássicos, conforme mostrado a seguir (Klir e Yuan, 1995).

a) Complemento de um Conjunto *Fuzzy*

Define-se o complemento *fuzzy*, como uma função do tipo $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$.

O complemento *fuzzy* padrão de um conjunto *fuzzy* A é o conjunto \bar{A} , cuja função de pertinência é definida por:

$$c(\mu_A(x)) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.1)$$

Cada valor $\mu_{\bar{A}}(x)$ pode ser interpretado como o grau com o qual $x \in \bar{A}$ ou, em outras palavras, como o grau com o qual $x \notin A$.

b) Intersecção de Conjuntos *Fuzzy*

A intersecção *fuzzy* é definida como uma função do tipo $i: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$.

A intersecção *fuzzy* padrão de dois conjuntos A e B , corresponde ao conjunto *fuzzy* $A \cap B$, cuja função de pertinência é definida pelo operador **min**, conforme a seguir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (4.2)$$

Um valor $\mu_{A \cap B}(x)$ pode ser interpretado como o grau de pertinência com o qual $x \in A$ e $x \in B$.

c) União de Conjuntos *Fuzzy*

De forma semelhante à intersecção *fuzzy*, a operação de união *fuzzy* é definida como u:
 $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$

Para os conjuntos A e B, a união *fuzzy* padrão é representada pelo conjunto *fuzzy* $A \cup B$, com função de pertinência definida pelo operador **max**.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (4.3)$$

O valor $\mu_{A \cup B}(x)$, determinado conforme a Equação 4.3, corresponde ao grau de pertinência com o qual $x \in A$ ou $x \in B$.

4.4.2 O Isomorfismo entre Conjuntos *Fuzzy* e Lógica *Fuzzy*

No Quadro 4.1, como em Klir e Folger (1988), apresentam-se as correspondências entre as operações com conjuntos *fuzzy* e a associação de proposições lógicas *fuzzy* do tipo “ x é A”.

Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Associações de Proposições <i>Fuzzy</i>
Complemento - \bar{A}	Negação - \bar{v}
Intersecção - \cap	Disjunção - \wedge
União - \cup	Conjunção - \vee
Conjunto Universal - X	Verdadeiro
Conjunto Vazio - \emptyset	Falso

Quadro 4.1 – Correspondência entre operações com conjuntos *fuzzy* e proposições *fuzzy*.
 Fonte: Klir e Folger, (1988).

As operações com conjuntos *fuzzy* podem ser utilizadas para o tratamento matemático

do raciocínio aproximado característico da Lógica *Fuzzy*, permitindo que uma proposição lógica *fuzzy* “ x é A ”, similar à representação “ $x \in A$ ”, na teoria de conjuntos *fuzzy*, possa ser verdadeira, com um grau de pertinência dentro do intervalo $[0,1]$. Considerando-se adicionalmente, as proposições “ x é B ”, “ x não é A ”, “ x é A e x é B ” e “ x é A ou x é B ”, e que:

$$\begin{aligned} v_1 &= \text{“}x \text{ é } A\text{”} \\ v_2 &= \text{“}x \text{ é } B\text{”} \\ v_3 &= \text{“}x \text{ não é } A\text{”} = \bar{v}_1 \\ v_4 &= \text{“}x \text{ é } A \text{ e } x \text{ é } B\text{”} \\ v_5 &= \text{“}x \text{ é } A \text{ ou } x \text{ é } B\text{”} \end{aligned}$$

Com base nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, no Quadro 4.1, e considerando que as proposições v_1 e v_2 são verdadeiras com graus de pertinência μ_{v_1} e μ_{v_2} , as proposições v_3 , v_4 e v_5 serão verdadeiras com graus de pertinência definidos com base nas operações de complemento, intersecção e união de conjuntos *fuzzy*, conforme:

$$\begin{aligned} \mu_{v_3} &= \mu_{\bar{v}_1} = 1 - \mu_{v_1} \\ \mu_{v_4} &= \mu_{v_1 \wedge v_2} = \min[\mu_{v_1}, \mu_{v_2}] \\ \mu_{v_5} &= \mu_{v_1 \vee v_2} = \max[\mu_{v_1}, \mu_{v_2}] \end{aligned}$$

4.5 Sistemas *Fuzzy*

Para o perfeito entendimento, sob o ponto de vista estrutural e de operação, de um Sistema *Fuzzy*, deve-se analisar inicialmente o procedimento para a obtenção de resultados ou conclusões a partir do raciocínio, adotado na Lógica Proposicional Clássica, estendendo-se posteriormente tal procedimento para a Lógica *Fuzzy*.

4.5.1 Mecanismo de Inferência na Lógica Clássica

Um dos mecanismos de inferência adotados na lógica clássica é o *modus ponens*, apresentado a seguir, e de grande importância em estudos de Engenharia (Tanscheit, 2003).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Premissa 1: } x \text{ é } A \\ \text{Premissa 2: Se } x \text{ é } A \text{ então } y \text{ é } B \\ \text{Consequência: } y \text{ é } B \end{array} \right.$$

De acordo com esse mecanismo de inferência, a proposição “y é B” (consequência) será verdadeira se as proposições “x é A” (premissa 1) e “se x é A então y é B” (premissa 2), forem verdadeiras. A premissa 2 corresponde a uma regra que define a proposição y é B como verdadeira, se a proposição x é A for verdadeira, sendo caracterizada como uma função lógica de implicação $v_1 \rightarrow v_2$, sendo: $v_1 = “x \text{ é } A”$ e $v_2 = “y \text{ é } B”$.

Sendo assim, o *modus ponens* pode ser representado pela combinação de funções lógicas $(v_1 \wedge (v_1 \rightarrow v_2)) \rightarrow v_2$. Segundo a Lógica Proposicional clássica, uma proposição representada por uma função lógica de implicação $v_1 \rightarrow v_2$ só será falsa se $v_1 = 1$ e $v_2 = 0$, ou seja, se a proposição v_1 for verdadeira e a proposição v_2 for falsa, o que significa que v_1 não implica em v_2 .

Tanscheit (2003) apresenta as seguintes tautologias (proposições sempre verdadeiras), onde o símbolo “ \leftrightarrow ” representa a função lógica de equivalência.

$$\text{Tautologia 1: } (v_1 \rightarrow v_2) \leftrightarrow \overline{(v_1 \wedge (\bar{v}_2))}$$

$$\text{Tautologia 2: } (v_1 \rightarrow v_2) \leftrightarrow ((\bar{v}_1) \vee (v_2))$$

Essas tautologias serão úteis na discussão sobre Sistemas *Fuzzy*. Pela tautologia 1, as

proposições $v_1 \rightarrow v_2$ e $\overline{(v_1 \wedge (\overline{v_2}))}$ serão sempre simultaneamente verdadeiras ou falsas e pela tautologia 2, o mesmo acontece com as proposições $(v_1 \rightarrow v_2)$ e $((\overline{v_1}) \vee (v_2))$, conforme demonstrado por Tanscheit (2003).

4.5.2 Definição, Estrutura e Operação de um Sistema *Fuzzy*

Klir e Yuan (1995) definem um Sistema *Fuzzy* como qualquer sistema cujas variáveis (pelo menos algumas delas) tem como estados, conjuntos *fuzzy* definidos em algum conjunto universal, que corresponde muitas vezes, a um intervalo de números reais. Tanscheit (2003) ilustra um sistema de inferência *fuzzy*, da forma como é mostrado na Figura 4.1.

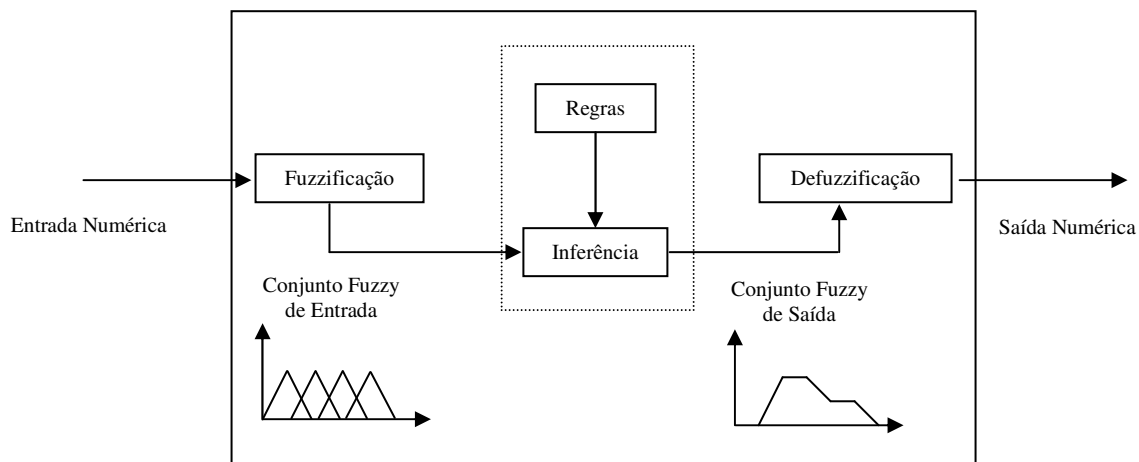


Figura 4.1 – Estrutura de um Sistema *Fuzzy*.

Fonte: Tanscheit (2003).

Em muitas aplicações práticas, as variáveis de entrada apresentam valores numéricos provenientes de medições, cálculos ou observações, representando o estado de um sistema externo, que conduz ao raciocínio quantitativo. A idéia de se utilizar um Sistema *Fuzzy* é converter tais variáveis numéricas em variáveis linguísticas, atribuindo às mesmas, termos linguísticos como estados possíveis, permitindo o raciocínio qualitativo ou aproximado. Por

outro lado, em algumas situações práticas, as variáveis de entrada já são caracterizadas como linguísticas, sendo a forma natural de expressão de um indivíduo comum e até mesmo de um especialista.

Na fase de fuzzyficação definem-se os conjuntos *fuzzy* que representarão os termos linguísticos associados à variável linguística que representa a variável numérica original. Cada conjunto *fuzzy* irá representar a interpretação qualitativa da variável de entrada, da forma como é feito pelo ser humano.

O motor de inferência do Sistema *Fuzzy* emula o raciocínio humano, a partir de um conjunto de regras, que utilizam os termos linguísticos previamente definidos para cada variável. Por exemplo, a regra **“Se (a temperatura for igual ou superior a 32°C) Então (ligar o sistema de condicionamento de ar)”**, escrita para compor a base de conhecimento de um sistema especialista convencional, que utiliza inferência com base em variáveis numéricas, seria substituída no caso de um Sistema *Fuzzy*, pela regra **“Se (a temperatura for elevada) Então (ligar o sistema de condicionamento de ar)”**.

Nesse exemplo, a utilização da regra que considera a variável “temperatura” uma variável linguística, pode contornar situações do tipo:

1º) Certamente, para uma temperatura de 31°C, também será conveniente que o sistema de condicionamento de ar seja ligado.

2º) Se a temperatura for monitorada a partir da leitura de um instrumento, um possível erro de medição pode determinar que o sistema de condicionamento de ar não seja ligado, quando na verdade isso deveria acontecer.

Como resultado do processo de inferência, obtém-se um conjunto *fuzzy* de saída e para aquelas aplicações, típicas das áreas de Engenharia, para as quais se necessita de uma saída

precisa, um procedimento de defuzzificação deve ser efetuado, para que se tenha uma interpretação numérica da informação *fuzzy*. Dois métodos de defuzzificação são descritos sucintamente por Tanscheit (2003): o do **centro de gravidade** (ou do cálculo do **centróide**), para o qual a saída numérica corresponde ao valor x do conjunto universal X , que divide a área sob a curva da função de pertinência do conjunto *fuzzy* de saída em duas partes iguais e o da **média dos máximos**, para o qual a saída numérica é obtida calculando-se a média entre os dois elementos extremos x_1 e x_2 , do conjunto universal, que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conjunto *fuzzy* de saída.

4.5.3 Mecanismo de Inferência na Lógica Fuzzy

Para a implementação de um Sistema Fuzzy, o *modus ponens* da Lógica Clássica deve ser transformado no *modus ponens* generalizado (Tanscheit, 2003), descrito da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Premissa 1: } x \text{ é } A^* \\ \text{Premissa 2: Se } x \text{ é } A \text{ então } y \text{ é } B \\ \text{Consequência: } y \text{ é } B^* \end{array} \right.$$

Para o *modus ponens* generalizado, os conjuntos A^* e B^* não correspondem necessariamente aos conjuntos A e B , respectivamente. Na Lógica Fuzzy, basta que exista um certo grau de similaridade entre a premissa 1 e o antecedente da regra, para que a mesma seja disparada. As premissas 1 e 2 são verdadeiras com graus de pertinência $\mu_{A^*}(x)$ e $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$, respectivamente e com base no isomorfismo entre conjuntos *fuzzy* e Lógica Fuzzy e nas tautologias 1 e 2 mostradas anteriormente, pode-se definir, para a função lógica de implicação:

Pela tautologia 1:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 - \min[\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)] \quad (4.4)$$

Pela tautologia 2:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (4.5)$$

Tanscheit (2003) define a seguinte questão, a ser resolvida por um Sistema *Fuzzy*, seguindo o mecanismo de inferência *modus ponens* generalizado:

“Dada uma relação entre dois conjuntos *fuzzy*, A e B, qual o consequente para um dado antecedente ?”

A relação em questão é a implicação correspondente à premissa 2, que na forma de uma regra, deve fazer parte da base de conhecimento do Sistema *Fuzzy* e a premissa 1 representa o antecedente dado, ou seja, o conjunto *fuzzy* de entrada. O *modus ponens* pode ser visto como um caso especial de composição de relações *fuzzy*, onde a primeira relação nada mais é do que um conjunto *fuzzy*.

Para esta situação especial, a função de pertinência do consequente B*, pode ser obtida por:

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) * \mu_{A \rightarrow B}(x, y)] \quad (4.6)$$

Nas situações em que a variável de entrada apresentar um valor numérico (não-*fuzzy*) igual a x' , a Equação 4.6 sofre uma simplificação e a função de pertinência associada ao conjunto B* é escrita como (Tanscheit, 2003):

$$\mu_{B^*}(y) = [\mu_{A^*}(x') * \mu_{A \rightarrow B}(x', y)] = [1 * \mu_{A \rightarrow B}(x', y)] = \mu_{A \rightarrow B}(x', y) \quad (4.7)$$

Nesse caso, pode-se utilizar as Equações 4.4 ou 4.5, fazendo: $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_{A \rightarrow B}(x', y)$

e $\mu_A(x) = \mu_A(x')$.

Tanscheit (2003) argumenta que as implicações definidas pelas Equações 4.4 e 4.5, aplicadas a problemas específicos da área de Engenharia, para as quais a noção de causa e efeito é importante, podem levar a resultados sem muito sentido. O autor procura ilustrar esse fato através de um exemplo para o qual se utiliza a Equação 4.4 para a definição da relação de implicação, resultando em uma função de pertinência $\mu_{B^*}(y)$ com uma quantidade infinita de valores y , com grau de pertinência não nulo. Deste modo, o autor sugere a definição da implicação, a partir dos operadores min ou produto, ou seja, a implicação só é verdadeira se o antecedente e o consequente forem verdadeiros, o que fornece como resultado:

$$\mu_{B^*}(y) = \mu_{A^*}(x') \wedge \mu_B(y) \quad (4.8)$$

Para o mesmo exemplo apresentado por Tanscheit (2003), a utilização da Equação 4.8 resulta em uma função $\mu_{B^*}(y)$ para a qual apenas um subconjunto do conjunto Y vai apresentar elementos cujo grau de pertinência em B^* é não nulo, sendo esse resultado mais coerente com problemas de Engenharia.

4.6 A Lógica *Fuzzy* na Tomada de Decisão

Klir e Yuan (1995) abordam a aplicação da Lógica *Fuzzy* aos problemas de tomada de decisão, enfatizando que as diversas teorias existentes nessa área tentam considerar a incerteza e a não especificidade inerentes à forma como os seres humanos formulam suas preferências, restrições e objetivos.

Além disso, os autores destacam as incertezas referentes aos resultados associados a cada uma das ações alternativas para a solução de um determinado problema. Desse modo, uma decisão é tomada em um ambiente de certeza, quando o resultado das ações alternativas puder ser determinado de forma precisa; uma decisão sob risco está associada à possibilidade

de se obter as distribuições de probabilidade dos resultados das ações e por fim, uma decisão sob incerteza é tomada quando não se conhece as distribuições de probabilidade e os resultados das ações é conhecido apenas de forma aproximada. Klir e Yuan afirmam ser essa última situação o domínio para a aplicação da Lógica *Fuzzy* na tomada de decisão.

No que se refere à tomada de decisão individual, Bellman e Zadeh apud Klir e Yuan (1995) propõem um modelo *fuzzy* para a tomada de decisão, no qual objetivos a serem alcançados e restrições são considerados conjuntos *fuzzy* e dado um conjunto de alternativas de solução, atribui-se para cada uma um grau de pertinência quanto ao alcance dos objetivos e atendimento às restrições. Quanto à tomada de decisão multicritério, Klir e Yuan apresentam um método que utiliza o conceito de relação *fuzzy* entre um conjunto C de critérios e um conjunto X de alternativas, sendo esta relação $R(C,X)$, definida como “ c é satisfeito por x ”. O método proposto permite a consideração de “pesos” w_i para cada critério, sendo atribuídos graus de pertinência para os possíveis valores a serem definidos para os mesmos.

Na seção seguinte, apresenta-se a metodologia de mapas causais *fuzzy*, que pode permitir a consideração das incertezas quanto aos efeitos de ações alternativas sobre diversos critérios estabelecidos para um problema de tomada de decisão multicritério e consequentemente, sobre os objetivos a serem alcançados.

4.7 Mapas Causais *Fuzzy*

Com base nas críticas feitas, na Seção 3.6, à metodologia clássica de apoio à decisão, apresenta-se nesta seção uma ferramenta, não só para estruturar um problema de apoio à decisão multicritério, como também para servir como meio de avaliação de ações alternativas. Trata-se dos mapas causais *fuzzy*, introduzidos por Bart Kosko (Kosko, 1986), combinando mapas causais com a Lógica *Fuzzy*.

Um mapa *fuzzy* é obtido quando a estrutura de um mapa causal é enriquecida mediante

a atribuição de “rótulos” a cada ligação entre conceitos. Isso deve permitir uma avaliação do grau de influência de um conceito sobre outro, resultando em uma estrutura que oferece condições para que se avalie o maior ou menor nível de influência de um conceito classificado como uma ação alternativa, sobre um conceito classificado com o um objetivo a ser alcançado.

4.7.1 Relações de Influência entre Conceitos de um Mapa Causal

As ligações entre os conceitos “ C_i ” e “ C_j ” de um mapa causal, representam relações “ e_{ij} ” de influência, causalidade ou implicação. Desse modo, no mapa da Figura 4.2, tem-se as relações de influência:

e_{12} : $C_1 \times C_2$ – relação de influência entre os conceitos C_1 e C_2 .

e_{13} : $C_1 \times C_3$ – relação de influência entre os conceitos C_1 e C_3 .

e_{24} : $C_2 \times C_4$ – relação de influência entre os conceitos C_2 e C_4 .

e_{34} : $C_3 \times C_4$ – relação de influência entre os conceitos C_3 e C_4 .

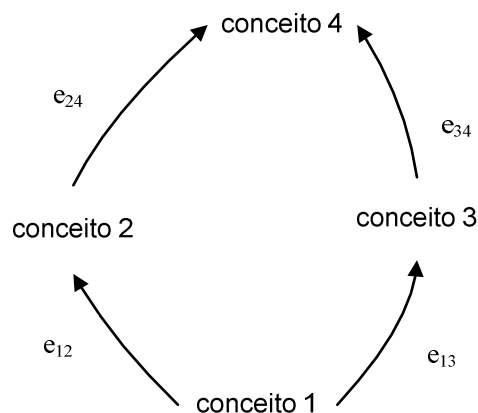


Figura 4.2 – Mapa causal e relações de influência entre conceitos.

Supondo que o conceito 1 represente uma ação alternativa para um determinado problema (conceito-ação), que os conceitos 2 e 3 representem os efeitos imediatos dessa ação

(conceitos-meio) e que sejam causas para o conceito 4 (conceito-fim), que é um objetivo a ser alcançado, a utilização de um mapa causal como o da Figura 4.2, para a avaliação da ação considerada, teria como objetivo verificar o efeito dessa ação sobre esse objetivo.

Propõe-se obter a resposta a esse questionamento, através de um processo de inferência causal, conforme já proposto por Axelrod (1976) e Kosko (1986), ou seja, utilizar a estrutura de um mapa causal como forma de raciocínio para que se possa deduzir que caminho mais influencia o alcance do objetivo pré-definido. A seguir, apresentam-se, como em Montibeller Neto (2000), formas alternativas de se conduzir tal processo.

4.7.2 Mapas Concisos

Em um mapa conciso, cada ligação entre conceitos recebe um valor do conjunto $\{-1, 0, 1\}$, que define que cada relação de influência pode ser negativa, inexistente ou positiva, respectivamente. Definidos os caminhos, entre conceitos que representam ações e conceitos que representam objetivos, bem como as relações de influência, associadas a cada caminho, a inferência causal é realizada para determinar os Efeitos Parciais (EPs) de cada caminho e o Efeito Total (ET) de uma ação sobre um objetivo, conforme exemplo da Figura 4.3.

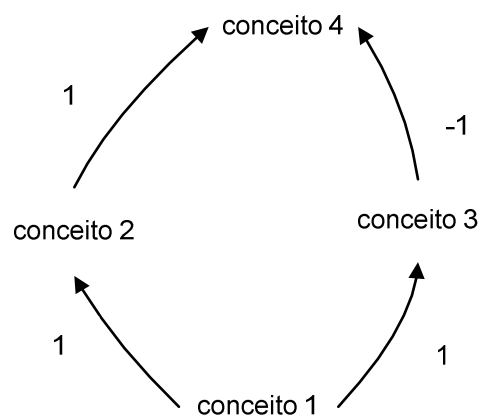


Figura 4.3 – Mapa conciso e relações de influência entre conceitos.

Existem dois caminhos entre o conceito-ação e o conceito-fim e desse modo, dois efeitos parciais devem ser determinados, multiplicando-se as intensidades das ligações que compõem cada caminho, conforme a seguir.

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-2-4:

$$EP_{1-2-4} = 1 \times 1 = 1$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-3-4:

$$EP_{1-3-4} = 1 \times -1 = -1$$

O efeito total do conceito-ação sobre o conceito-fim será:

Positivo – se todos os caminhos entre esses dois conceitos tiverem efeitos parciais positivos.

Negativo - se todos os caminhos entre esses dois conceitos tiverem efeitos parciais negativos.

Indeterminado – se alguns caminhos tiverem efeitos parciais positivos e outros negativos.

No exemplo em análise, verifica-se uma situação de indeterminação, que faz surgir a idéia de se buscar o aumento do poder de inferência do mapa causal. A abordagem a seguir insere um caráter quantitativo às relações de influência, na tentativa de resolver os problemas apresentados pela abordagem que analisa tais relações apenas de forma qualitativa.

4.7.3 Mapas Causais com Pesos

A idéia é atribuir, a cada relação de influência de um mapa causal, um valor numérico (peso) a ser utilizado no cálculo dos efeitos parciais e totais de um conceito sobre outro. Para o mapa já utilizado anteriormente, os seguintes pesos foram atribuídos às relações de influência:

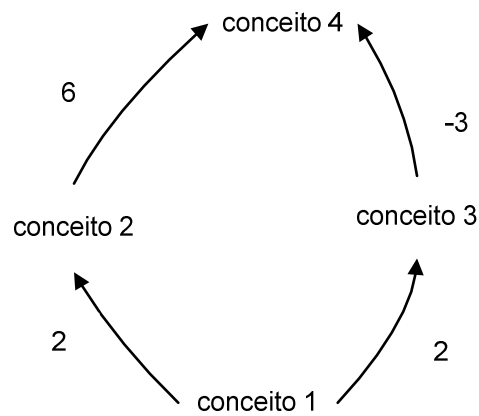


Figura 4.4 – Mapa causal e pesos para as relações de influência.

Nesse caso, tem-se como resultado:

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-2-4:

$$EP_{1-2-4} = 2 \times 6 = 12$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-3-4:

$$EP_{1-3-4} = 2 \times -3 = -6$$

Considerando o mapa causal com pesos, o efeito total do conceito-ação sobre o conceito-fim deve ser obtido pela soma dos efeitos parciais:

$$ET_{1-4} = EP_{1-2-4} + EP_{1-3-4} = 12 - 6 = 6$$

Fica evidente, nesse exemplo, a possibilidade de que influências positivas e negativas apresentem valores numéricos diferentes, permitindo um detalhamento maior com respeito ao

efeito total de um conceito-ação sobre um conceito-fim. Pacheco (2005) apresenta uma forma semelhante para determinar as influências indiretas entre conceitos de um mapa causal, a partir de um procedimento matemático simples, que corresponde à sucessivas operações de potenciação com uma matriz de valências, cujos elementos representam os pesos das ligações entre conceitos adjacentes no mapa.

4.7.4 Mapas Fuzzy

A abordagem descrita na Subseção 4.7.3 exige que os indivíduos envolvidos no processo de avaliação de ações alternativas efetuem um julgamento quantitativo sobre a intensidade das relações de influência entre conceitos do mapa. Aspectos já apresentados no Capítulo 3, relativos aos julgamentos sobre diferenças de atratividade entre níveis de impacto e entre pontos de vista fundamentais (metodologia clássica de apoio à decisão), também são pertinentes aos julgamentos sobre as intensidades das relações de influência em um mapa causal. Em outras palavras, destaca-se nesse ponto as dificuldades com as quais um indivíduo pode se deparar, quando da tentativa da definição de valores numéricos precisos para rotular as intensidades das relações de influência entre conceitos de um mapa causal.

Como proposta para o tratamento da incerteza na definição das relações de influência em um mapa causal, Kosko (1986) propôs um método para o qual as relações e_{ij} assumem valores pertencentes a um conjunto P , cujos elementos representam intensidades de influência das relações⁸ e podem variar no intervalo $[0,1]$, como os graus de pertinência em conjuntos *fuzzy*, ou até mesmo corresponderem a termos linguísticos. Ao se utilizarem termos linguísticos, os efeitos parciais e totais de um conceito sobre outro são avaliados com base nas operações de intersecção e união de conjuntos *fuzzy*, por meio dos operadores **min** e **max**, substituindo o produto e a soma utilizados nos modelos de mapa apresentados nas Subseções 4.7.2 e 4.7.3.

⁸ Montibeller Neto (2000) fala em “intensidade de influência percebida” – IIP.

Como exemplo, no mapa da Figura 4.5, o conjunto P é composto pelos termos linguísticos p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , pré-ordenados pela intensidade de influência. Ou seja: $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ e $p_1 < p_2 < p_3 < p_4$.

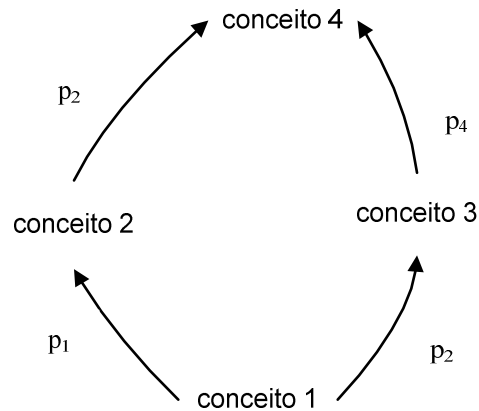


Figura 4.5 – Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por termos linguísticos.

Por meio do mapa *fuzzy* mostrado na Figura 4.5, tem-se:

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-2-4:

$$EP_{1-2-4} = \min\{p_1, p_2\} = p_1$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-3-4:

$$EP_{1-3-4} = \min\{p_2, p_4\} = p_2$$

O efeito total do conceito-ação sobre o conceito-fim deve ser obtido por:

$$ET_{1-4} = \max\{EP_{1-2-4}, EP_{1-3-4}\} = \max\{p_1, p_2\} = p_2$$

Zhang, Chen e Bezdek (1989) propuseram a utilização de uma faixa de variação para

as relações de influência, no intervalo $[-1, 1]$. Os operadores \min e \max são empregados para representar as operações de intersecção e união, dessa vez, com base nas operações aritméticas com intervalos (Klir e Yuan, 1995), já que para cada relação, definem-se um limite inferior (x) e um limite superior (y) de intensidade. Desse modo, tem-se:

- Intersecção de duas relações de influência representadas pelos intervalos (x,y) e (u,v) :

$$(x,y) * (u,v) = (\min(x \cap u, x \cap v, y \cap u, y \cap v), \max(x \cap u, x \cap v, y \cap u, y \cap v))$$

- União de duas relações de influência representadas pelos intervalos (x,y) e (u,v) :

$$(x,y) + (u,v) = (\min(x,u), \max(y,v))$$

A seguir, o método é aplicado ao mesmo mapa dos exemplos anteriores.

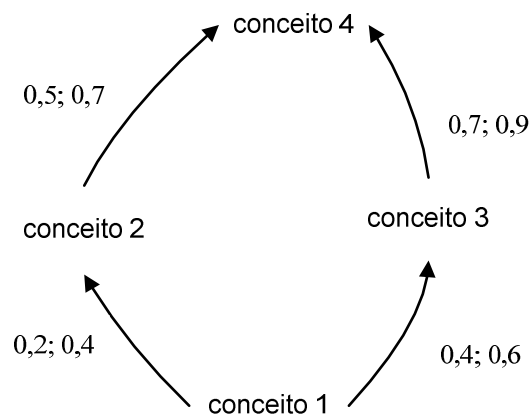


Figura 4.6 - Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por intervalos.

Os efeitos parciais no mapa da Figura 4.6 são obtidos como a seguir:

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-2-4:

$$\begin{aligned} EP_{1-2-4} &= (\min (0,2 \cap 0,5; 0,2 \cap 0,7; 0,4 \cap 0,5; 0,4 \cap 0,7), \max (0,2 \cap 0,5; 0,2 \cap 0,7; 0,4 \cap 0,5; 0,4 \cap 0,7)) \\ &= (\min (0,2; 0,2; 0,4; 0,4), \max (0,2; 0,2; 0,4; 0,4)) = (0,2; 0,4) \end{aligned}$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-3-4:

$$\begin{aligned} EP_{1-3-4} &= (\min (0,4 \cap 0,7; 0,4 \cap 0,9; 0,6 \cap 0,7; 0,6 \cap 0,9), \max (0,4 \cap 0,7; 0,4 \cap 0,9; 0,6 \cap 0,7; 0,6 \cap 0,9)) \\ &= (\min (0,4; 0,4; 0,6; 0,6), \max (0,4; 0,4; 0,6; 0,6)) = (0,4; 0,6) \end{aligned}$$

O efeito total considerando o mapa da Figura 4.6 é obtido pela união dos efeitos parciais:

$$ET_{1-4} = (\min(0,2; 0,4), \max(0,4; 0,6)) = (0,2; 0,6)$$

4.7.5 Mapas *Fuzzy* Baseados nos Modelos de Kosko e Zhang

Por fim, apresenta-se o modelo de mapa *fuzzy* proposto por Montibeller Neto (2000), com base em algumas críticas feitas aos modelos anteriores, principalmente por que:

- a definição de relações de influência de forma quantitativa vai de encontro à forma natural de raciocínio do ser humano;
- a utilização de termos linguísticos é mais flexível e natural, no entanto, para decisores diferentes, cada termo pode ter significado diferente;

Desse modo Montibeller Neto buscou agregar características positivas dos modelos propostos por Kosko (1986) e Zhang, Chen e Bezdek (1989). Para esse modelo, as relações de influência e_{ij} são definidas como:

$$e_{ij}: C_i \times C_j \rightarrow (x, y)$$

Em que:

$$x \text{ e } y = s \cdot P$$

$s = +1 \Rightarrow$ influência positiva de C_i em C_j .

$s = -1 \Rightarrow$ influência negativa de C_i em C_j .

$s = 0 \Rightarrow s = +1 \Rightarrow C_i$ não influencia C_j .

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ e $p_1 < p_2 < \dots < p_m$.

Portanto, no modelo de Montibeller Neto, utiliza-se o intervalo proposto por Zhang, Chen e Bezdek (1989), com termos linguísticos propostos por Kosko (1986). O modelo de mapa *fuzzy* proposto por Montibeller Neto, é mostrado na Figura 4.7.

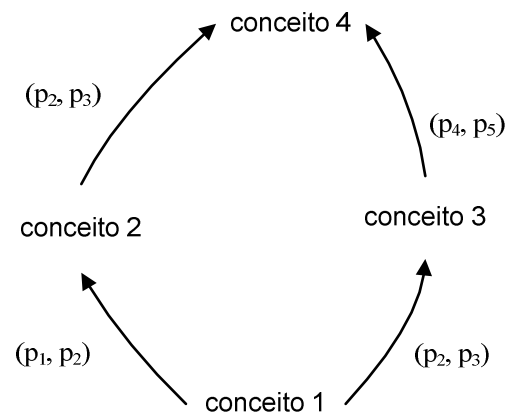


Figura 4.7 - Mapa *fuzzy* com relações de influência representadas por intervalos de termos linguísticos.

No exemplo de aplicação apresentado em Montibeller Neto (2000), utilizam-se, para compor o conjunto P , os termos linguísticos “muito fraca”, “fraca”, “mediana”, “forte”, “muito forte” e “extrema”. A escolha de tais termos fica a cargo dos decisores e desse modo, outros termos poderão ser utilizados. A aplicação desse tipo de inferência ao problema representado

pelo mapa da Figura 4.7 resulta nos seguintes efeitos parciais e total:

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-2-4:

$$\begin{aligned} EP_{1-2-4} &= (\min (p_1 \cap p_2; p_1 \cap p_3; p_2 \cap p_2; p_2 \cap p_3), \max (p_1 \cap p_2; p_1 \cap p_3; p_2 \cap p_2; p_2 \cap p_3)) \\ &= (\min (p_1; p_1; p_2; p_2), \max (p_1; p_1; p_2; p_2)) = (p_1; p_2) \end{aligned}$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-fim, passando pelo caminho 1-3-4:

$$\begin{aligned} EP_{1-3-4} &= (\min (p_2 \cap p_4; p_2 \cap p_5; p_3 \cap p_4; p_3 \cap p_5), \max (p_2 \cap p_4; p_2 \cap p_5; p_3 \cap p_4; p_3 \cap p_5)) \\ &= (\min (p_2; p_2; p_3; p_3), \max (p_2; p_2; p_3; p_3)) = (p_2; p_3) \end{aligned}$$

O efeito total do conceito 1 sobre o conceito 4 é obtido por:

$$ET_{1-4} = (\min(p_1; p_2), \max(p_2; p_3)) = (p_1; p_3)$$

Para o caso em que $x = y$ e $u = v$ para cada relação, ou seja, consideram-se iguais os limites inferior e superior, a operação de intersecção passa a ser definida, de forma simplificada, como:

$$(x, x) * (u, u) = x \wedge u$$

4.8 Conclusões

A fundamentação teórica apresentada nesse capítulo demonstra a aplicação potencial da técnica de Sistemas Especialistas *Fuzzy* e da metodologia de Mapas Causais *Fuzzy*, no apoio à decisão para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos nas empresas do setor elétrico, permitindo: 1) a incorporação do conhecimento especializado; 2) o tratamento das

incertezas inerentes à forma como os atores participantes do processo expõem suas preferências e objetivos e efetuam seus julgamentos quanto aos desempenhos das estratégias de ação; 3) o aumento da credibilidade dos resultados obtidos, oferecendo uma maneira sistemática de estruturação do problema e avaliação de estratégias alternativas.

O conteúdo desse capítulo, juntamente com o que foi exposto no Capítulo 3, demonstra a existência de caminhos alternativos a serem seguidos na busca de soluções para o problema de Gerenciamento de Ativos. Por um lado, a metodologia clássica, baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-attribute Utility Theory* – MAUT), que considera a agregação dos diversos aspectos considerados importantes para a avaliação de ações alternativas, em uma função de agregação, atribuindo-se pesos a cada critério.

Por outro lado, a metodologia proposta por Montibeller Neto (2000) que tem por característica básica, conforme Kosko (1986) e Zhang, Chen e Bezdek (1989), o aproveitamento da rica estrutura de um mapa causal, sob o ponto de vista da relação de causa-efeito entre conceitos, para efetuar a estruturação do problema e a avaliação das alternativas, utilizando uma mesma ferramenta. Verifica-se que seguidores de ambos os caminhos podem se beneficiar do que é oferecido pelas metodologias apresentadas.

Nesse trabalho, conforme será apresentado no capítulo seguinte, aplica-se o mapa causal *fuzzy* baseado no modelo de Montibeller Neto, para a estruturação do problema de Gerenciamento de Ativos e para a avaliação de estratégias de ação alternativas, sendo essa tarefa executada por um sistema especialista *fuzzy*.

5

METODOLOGIA PROPOSTA PARA O APOIO À DECISÃO NO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DE TRANSFORMADORES DE FORÇA

5.1 Introdução

As considerações feitas com relação à importância dos transformadores de força no contexto dos sistemas elétricos, bem como os fundamentos teóricos apresentados nos capítulos anteriores dão condições à proposição de uma metodologia para o apoio à decisão no que diz respeito ao gerenciamento do ciclo de vida desses equipamentos e de um modelo de aplicação associado.

Inicialmente, apresentam-se as premissas básicas adotadas e a visão global do Gerenciamento de Ativos, segundo tal metodologia. Em seguida, apresenta-se o tratamento dado à questão do impacto ambiental relativo às atividades de manutenção e por fim, apresenta-se o modelo de aplicação como uma estrutura modularizada, descrevendo-se cada um dos módulos que o compõem.

5.2 Premissas Básicas da Metodologia Proposta

As seguintes premissas servem como base para a metodologia proposta:

- a estratégia tradicional de gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força,

adotada por uma empresa, deve ser comparada com estratégias alternativas, geradas com base na avaliação das condições de operação e do nível de risco da falha terminal do equipamento em análise;

- para a comparação das estratégias de ação, adota-se uma abordagem monocritério, baseada no Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido (VPFCL), tradicionalmente utilizada em estudos de planejamento no setor elétrico, denominada avaliação clássica, combinada com uma abordagem multicritério alternativa, denominada avaliação estratégica, que deve permitir, juntamente com aspectos técnicos e econômicos, a consideração de aspectos ambientais, bem como orientar para o alcance dos objetivos estratégicos e para o cumprimento da missão da empresa;
- na avaliação da condição do equipamento deve-se utilizar a análise dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante, por meio do conhecimento especializado e das versões *fuzzy* de três métodos tradicionalmente utilizados no setor elétrico;
- como base para a avaliação do nível de risco da falha terminal e para as avaliações clássica e estratégica das ações alternativas, deve-se simular, de forma probabilística, a operação do equipamento, permitindo considerar o comportamento aleatório associado à ocorrência de falhas e ao ritmo de envelhecimento do mesmo;
- a(s) solução(ões) encontrada(s) não deve(m) ser prescritiva(s), devendo servir para apoiar o(s) decisor(es), permitindo inclusive a geração de novas soluções, baseadas na avaliação das estratégias de ação inicialmente propostas em cada aspecto técnico, econômico e ambiental considerado e na identificação dos pontos fortes e fracos dessas estratégias.

5.3 O Gerenciamento de Ativos Segundo a Metodologia Proposta

Com a metodologia proposta, pretende-se tratar o problema do Gerenciamento de Ativos em todos os aspectos relevantes, considerando de forma integrada e em uma sequência lógica, as diversas etapas do processo e permitindo desse modo, a obtenção de soluções que resultem efetivamente na melhoria das condições de operação do equipamento em análise, na

redução dos riscos associados à falha e na definição do melhor momento para a substituição do mesmo.

Para isso, apresenta-se na Figura 5.1, a visão global do GA, que serviu de orientação para a implementação do modelo de aplicação da metodologia proposta. Deve-se observar que a proposição de estratégias de ação e a tomada de decisão têm como base quatro pontos fundamentais: 1º) a avaliação das condições de operação do equipamento; 2º) a avaliação do nível de risco da falha terminal do equipamento; 3º) a avaliação do desempenho das estratégias de ação, sob os pontos de vista técnico, econômico e ambiental; 4º) o alcance dos objetivos estratégicos e o cumprimento da missão da empresa.

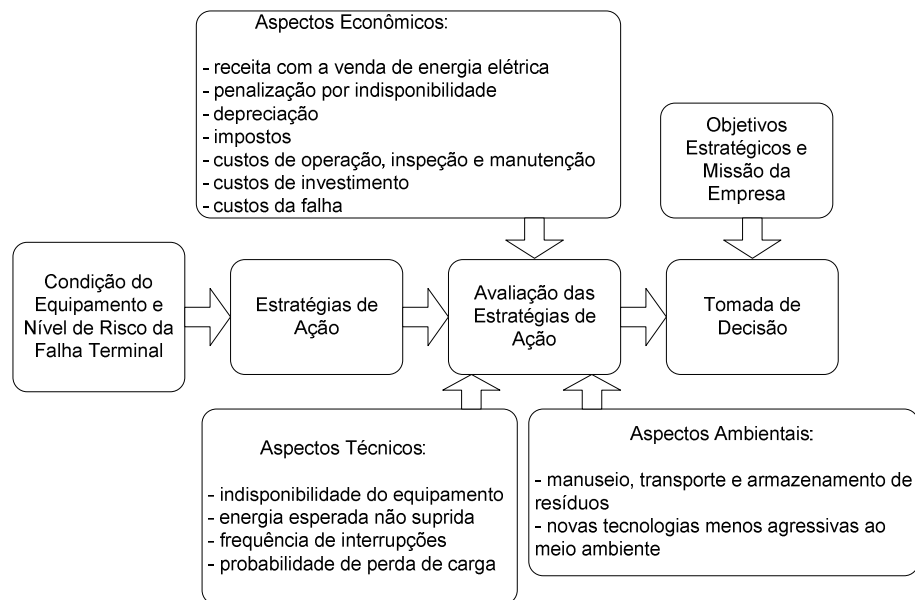


Figura 5.1 – Visão global do Gerenciamento de Ativos segundo a metodologia proposta.

A avaliação das condições do equipamento e do nível de risco da falha terminal devem orientar a proposição de estratégias de ação alternativas à estratégia tradicionalmente adotada pela empresa. Já a avaliação técnica, econômica e ambiental, bem como a observação do alcance dos objetivos estratégicos e do cumprimento da missão da empresa visam comparar tais estratégias alternativas, identificando seus pontos fortes e fracos e possibilitando a

definição de estratégias de ação adicionais.

5.4 A Consideração do Impacto Ambiental no Gerenciamento do Ciclo de Vida de Transformadores de Força

A minimização do impacto ambiental referente às atividades de manutenção tem sido abordada em inúmeros trabalhos. Nesse trabalho propõe-se levar em conta a questão ambiental, considerando-se ser esse um aspecto relevante para a definição de estratégias para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos no setor elétrico.

Quanto à literatura que associa o Gerenciamento de Ativos com aspectos ambientais, podemos citar os trabalhos de Rimell (1999) e Butera (2000), que afirmam que as políticas de gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos devem refletir os objetivos de diversos agentes, inclusive daqueles que atuam na preservação do meio ambiente. Palola *et al.* (2006) relacionam um conjunto de atributos a serem considerados na tomada de decisão quanto ao Gerenciamento de Ativos, inclusive os de caráter ambiental e que visam beneficiar a sociedade, propondo a tradução do impacto ambiental em termos econômicos.

No âmbito do setor elétrico brasileiro, Nunes Jr., Monteiro e Lopes (2005) propõem procedimentos para o tratamento de áreas contaminadas por vazamentos de óleo isolante de transformadores devido às falhas graves, seguidas de incêndio e explosão. Esses autores apontam, como efeitos indesejáveis de tais acidentes, além da contaminação do solo e águas, o comprometimento da imagem corporativa, as penalidades impostas, os custos de recuperação das áreas contaminadas, problemas com o descarte de material e efeitos sobre seres humanos.

Com base nos trabalhos mencionados, pode-se perceber a relevância da consideração do impacto ambiental, quando da definição de estratégias para o gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos elétricos. Prejuízos podem surgir devido à ocorrência de falhas graves, ou até mesmo, devido a acidentes ocorridos durante as atividades de manutenção nos

equipamentos, considerando-se que atividades mais frequentes aumentariam as possibilidades de acidentes. O grande desafio diz respeito à forma de quantificação dos impactos negativos das falhas e das atividades de manutenção.

Desse modo, vislumbra-se uma forma de avaliar a intensidade do impacto negativo das falhas e das atividades de manutenção sobre o meio ambiente. Essa avaliação consideraria, entre outras coisas: a existência ou não de rios, lagos, mares, lençóis freáticos, plantações e áreas de preservação, nas proximidades do local onde o equipamento opera; o volume de solo e água sujeito à contaminação, dependente do volume de óleo contido no equipamento e a capacidade de absorção do solo. Entende-se que uma avaliação desse tipo só seja possível nas situações em que se tenha um histórico de acidentes ocorridos no passado e/ou se disponha de especialistas na área em questão.

Na metodologia proposta, considerando-se as dificuldades inerentes à avaliação desse aspecto, como já mencionado, entende-se ser adequada a utilização de uma avaliação qualitativa, por meio do raciocínio aproximado, utilizando os Sistemas *Fuzzy*, permitindo que o impacto ambiental relativo ao gerenciamento do ciclo de vida de um equipamento, seja avaliado utilizando-se termos linguísticos e funções de pertinência *fuzzy*. Na Seção 5.9, detalha-se a avaliação das estratégias de ação, sob o ponto de vista do impacto ambiental.

5.5 Modelo de Aplicação da Metodologia Proposta

A Figura 5.1, apresentada na Seção 5.3, sugere uma estrutura modularizada para o modelo de aplicação da metodologia proposta. Assim, três módulos compõem esse modelo:

Módulo 1 – Visa simular, de forma probabilística, a operação do equipamento em análise, submetido a diversas estratégias de ação e quantificar as variáveis de caráter técnico e econômico, a serem utilizadas na fase de avaliação dessas estratégias.

Módulo 2 – Esse módulo foi implementado na forma de um sistema especialista *fuzzy* e visa

avaliar as condições do equipamento, quanto à isolamento sólida e líquida e o nível de risco da falha terminal, além de propor linhas de ação plausíveis que devem orientar a geração das estratégias de ação que serão confrontadas com a estratégia tradicional.

Módulo 3 – Implementado também na forma de um sistema especialista *fuzzy*, visa a avaliação estratégica das estratégias de ação.

O modelo de aplicação é caracterizado pela existência de um fluxo de informações entre os módulos, conforme ilustrado na Figura 5.2, o que mostra a dependência de um módulo com relação aos resultados fornecidos por outro módulo e a necessidade de se obedecer a uma sequência lógica para a execução dos mesmos.

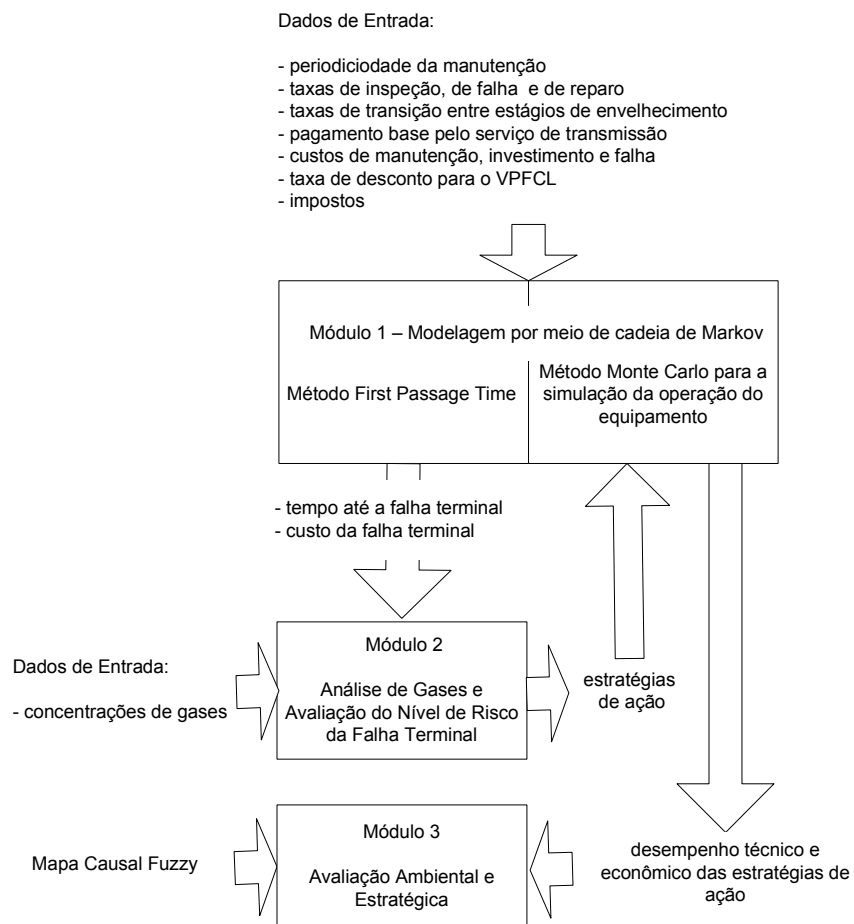


Figura 5.2 – Fluxo de informações entre os módulos do modelo de aplicação.

5.6 O Módulo 1 do Modelo de Aplicação

A simulação da operação do equipamento segue a estrutura computacional mostrada na Figura 5.3.

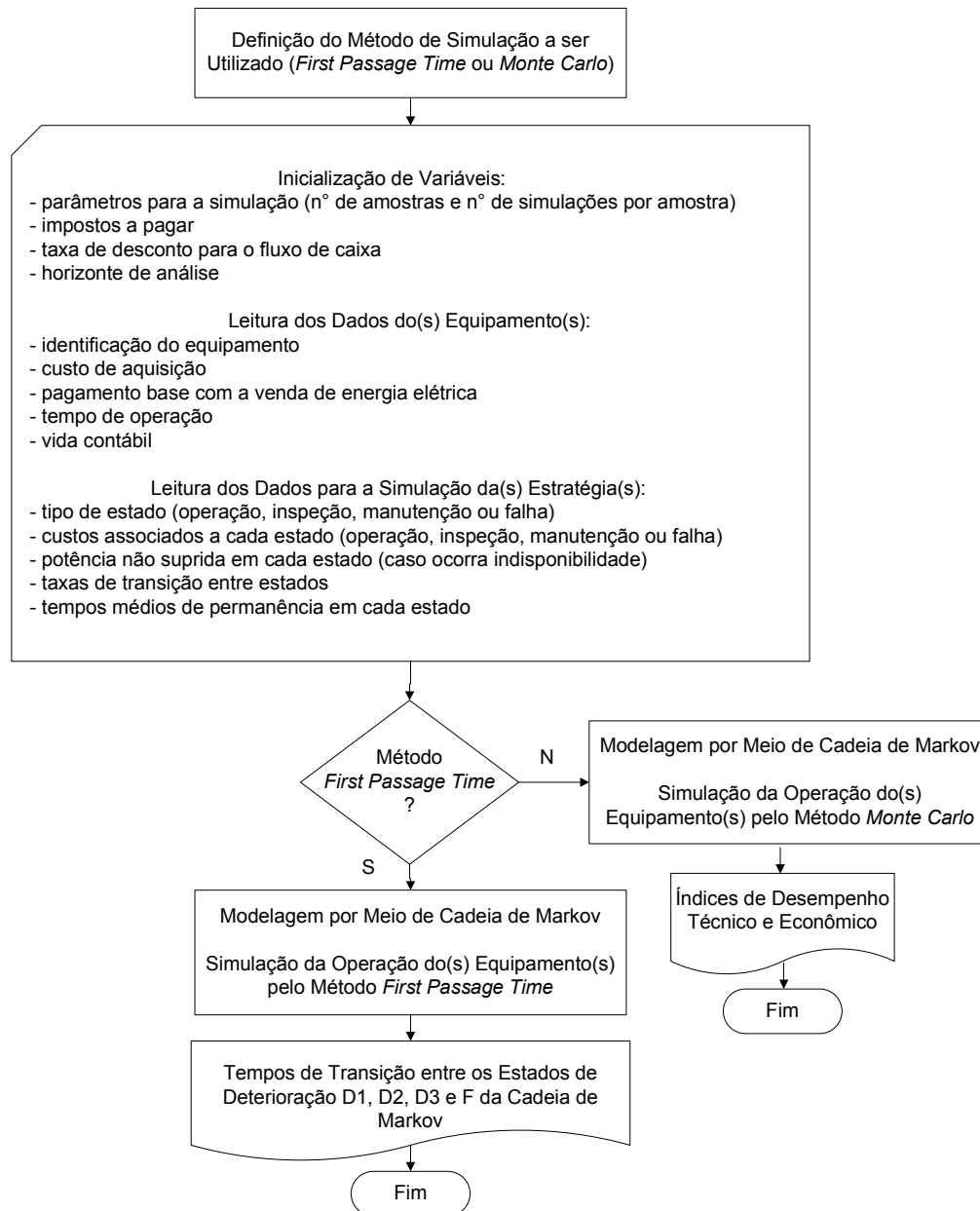
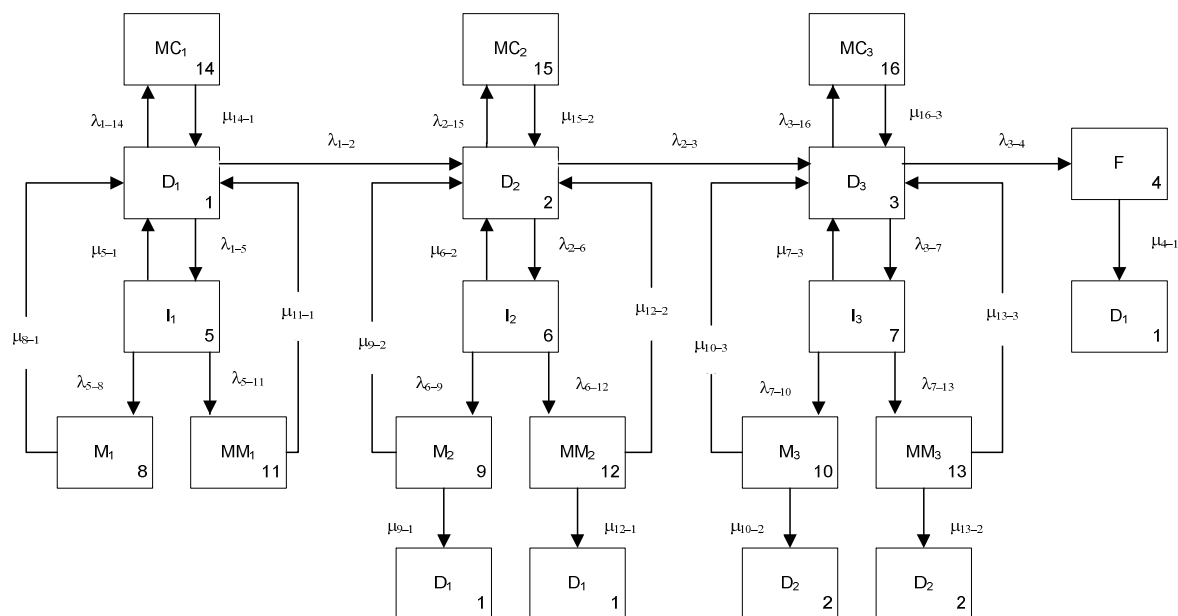


Figura 5.3 – Fluxograma do módulo de simulação da operação do equipamento.

A operação do equipamento é simulada, para um horizonte de análise previamente definido, sendo cada estratégia de ação modelada pela cadeia de Markov a 16 estados mostrada na Figura 5.4. Nessa figura, embora não apresentado de forma explícita, deve-se considerar que, com a manutenção preventiva maior, caracterizada pela execução de tarefas mais efetivas, tem-se uma maior possibilidade de que o equipamento retorne ao estágio de deterioração anterior.



D_i - estágio de deterioração i .
 I_i - atividade de inspeção no estágio de deterioração i .
 M_i - atividade de manutenção preventiva menor no estágio de deterioração i .
 MM_i - atividade de manutenção preventiva maior no estágio de deterioração i .
 MC_i - atividade de manutenção corretiva no estágio de deterioração i .
 F - falha terminal do equipamento.

Figura 5.4 – Cadeia de Markov para a simulação da operação do equipamento.
 Adaptada de Nuñez (2004).

Um estudo preliminar referente à aplicação do módulo 1 teve como objetivo verificar a sensibilidade dos resultados fornecidos, em função da variação dos parâmetros que representam as taxas de transição entre os estados da cadeia de Markov. Nesse estudo, verificou-se que variações de $\pm 10\%$ nas taxas de transição entre os estados D_1 , D_2 e D_3 e os

estados adjacentes resultaram em uma variação média de 7,8 % na indisponibilidade do equipamento (h/ano). Já para variações de $\pm 20 \%$ e $\pm 30 \%$, as variações médias na indisponibilidade foram de 21,7 % e 34,4 %, respectivamente, o que demonstra uma considerável sensibilidade dos resultados quanto às variações das taxas de transição entre estados e alerta para a importância da correta definição desses parâmetros.

A representação dos possíveis estados (operação, manutenção e falha) de um equipamento por meio de cadeias de Markov, cuja fundamentação teórica é apresentada no Anexo 2, foi utilizada em diversos trabalhos, tais como em Endrenyi, Anders e Da Silva (1998) e Anders, Endrenyi e Yung (2001), que apresentam modelos para a avaliação dos efeitos da manutenção sobre a confiabilidade e sobre os custos associados e Nuñez (2004) que apresenta um modelo para o gerenciamento da ativos dos sistemas de transmissão. Lehtonen (2006) aponta as cadeias de Markov como uma ferramenta poderosa para estimar a frequência de falhas de um equipamento.

Em uma primeira etapa, o módulo 1, por meio do método *First Passage Time*, pode fornecer como resultados, para cada estratégia de ação, o tempo estimado até a falha terminal do equipamento e o custo dessa falha terminal. Posteriormente, por meio do método *Monte Carlo*, obtém-se o desempenho técnico e econômico de cada estratégia de ação.

A seguir, descrevem-se em resumo, os dois métodos de simulação utilizados no módulo 1. A formulação matemática do método *First Passage Time* e o critério de convergência do método *Monte Carlo* são apresentados no Anexo 2.

5.6.1 O Método *First Passage Time*

Com esse método de simulação pode-se estimar o tempo até a falha terminal, além de identificar, com base no tempo em operação, o estágio atual de envelhecimento do equipamento dentro da cadeia de Markov. O tempo até a falha terminal, com o custo da falha

terminal associado são fornecidos posteriormente ao módulo 2, para se estimar o nível de risco da falha terminal e o estágio atual de deterioração serve como estado inicial para a simulação da operação futura do equipamento, quando submetido às estratégias de ação alternativas.

Endrenyi, Anders e Da Silva (1998), Anders, Endrenyi e Yung (2001) e Nuñez (2004) utilizaram o método *First Passage Time* para estimar o tempo médio para a primeira transição entre os estados i e j de uma cadeia de Markov. Com isso, pode-se traçar a curva de vida do equipamento, que representa os tempos de transição entre os estados de deterioração e estimar o efeito de políticas de manutenção sobre o tempo de vida útil remanescente, uma vez conhecido o estado atual de deterioração. O traçado da curva de vida, que representa graficamente o tempo até a falha, permite identificar uma eventual situação de envelhecimento acelerado do equipamento, bem como antecipar a falha terminal, com ações de manutenção ou com a substituição definitiva do mesmo.

5.6.2 O Método *Monte Carlo*

O método de simulação *Monte Carlo* foi utilizado por diversos autores, como forma de simular a operação de equipamentos elétricos. Billinton e Lian (1993) utilizaram esse método para simular os tempos de permanência nos três estados de uma cadeia de Markov simplificada e assim estimar a indisponibilidade de equipamentos em subestações. Em Billinton e Wang (1999), os tempos de permanência nos estados de operação e fora de operação foram simulados visando estimar a taxa de falha média, a duração média da falha e a indisponibilidade anual média, associadas a um ponto de suprimento de energia. Tondello (2001) utilizou a simulação *Monte Carlo* para avaliar o risco associado ao serviço de transmissão de energia elétrica.

Na Figura 5.5 ilustra-se a utilização do método *Monte Carlo*.

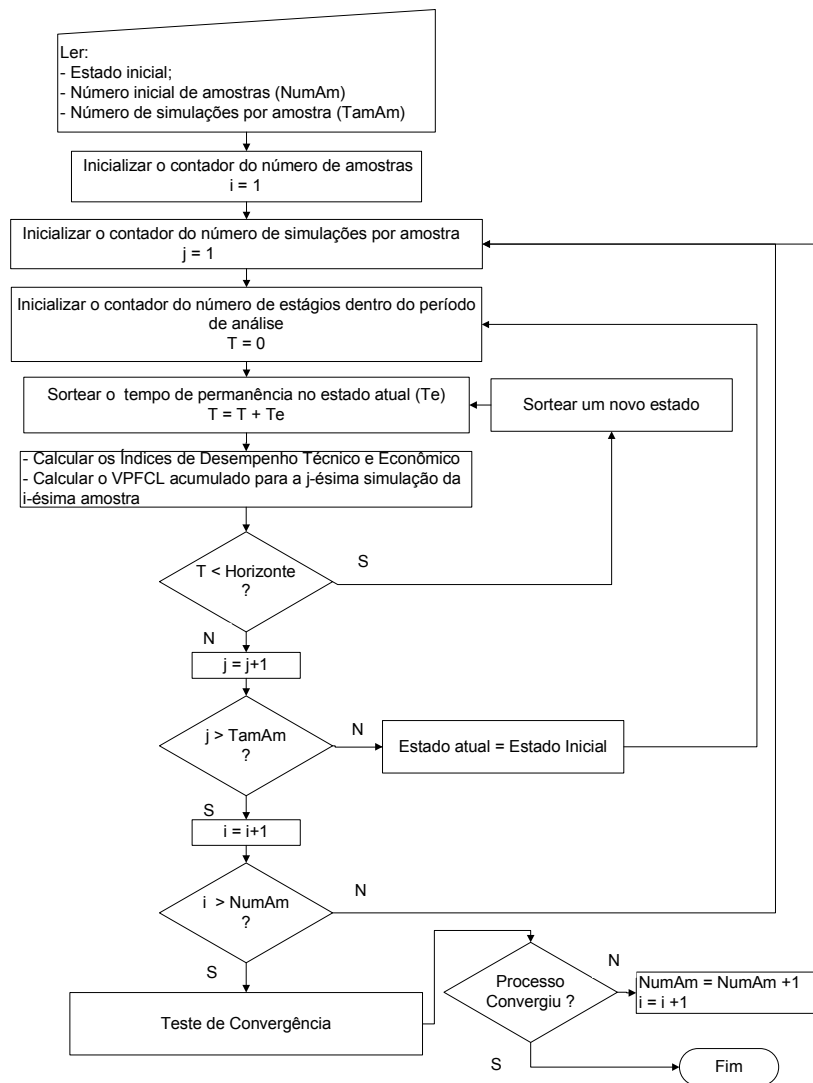


Figura 5.5 – Simulação da operação do equipamento – Método *Monte Carlo*. Adaptada de Nuñez (2004).

Na metodologia proposta, utiliza-se a simulação *Monte Carlo* como em Nuñez (2004), para simular a operação do equipamento em análise, submetido às diversas estratégias de gerenciamento do ciclo de vida do mesmo, gerando os índices utilizados na avaliação técnica e econômica dessas estratégias. Para isso, deve-se definir previamente o número inicial de amostras e o número de simulações por amostra a serem produzidas pelo método e a

simulação da operação do equipamento ao longo do período de análise é realizada por meio do sorteio das transições entre estados e dos tempos de permanência em cada estado da cadeia de Markov, dependentes das probabilidades de transição entre estados e dos tempos médios de permanência em cada estado, definidos como parâmetros de entrada do módulo.

Os valores esperados para os índices de desempenho técnico e econômico são calculados pela média dos valores obtidos para cada simulação realizada.

5.6.3 Avaliação Clássica

A avaliação clássica oferece a possibilidade de ordenação das estratégias de ação quanto ao desempenho com relação a um conjunto de índices técnicos e econômicos, tradicionalmente utilizados no setor elétrico e quanto ao Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido.

a) Avaliação Técnica – Índices de Confiabilidade

Como em Nuñez (2004), consideram-se os índices de confiabilidade definidos a seguir.

a.1) Valor Esperado da Indisponibilidade – *Loss of Load Expectation (LOLE)*

Representa o número de horas de indisponibilidade do equipamento em um ano, devido aos eventos que correspondem à interrupção no suprimento de energia elétrica (manutenção preventiva, manutenção corretiva e falha do equipamento).

$$LOLE = \frac{LOLE_t}{n} \quad (5.1)$$

Em que:

LOLE – Valor esperado da indisponibilidade anual (h/ano).

LOLE_t – Valor esperado da indisponibilidade acumulada ao longo do período de análise (h).

n – número de estágios do período de análise.

a.2) Valor Esperado da Energia Não Suprida – *Expected Energy not Supplied (EENS)*

Representa a energia não suprida em um ano, devido aos eventos que correspondem à interrupção no suprimento de energia elétrica.

$$EENS = \frac{EENS_t}{n} \quad (5.2)$$

Em que:

$EENS$ – Valor esperado da energia não suprida (MWh/ano).

$EENS_t$ – Valor esperado da energia não suprida acumulada ao longo do período de análise (MWh).

n – número de estágios do período de análise.

a.3) Valor Esperado da Frequência de Interrupções – *Loss of Load Frequency (LOLF)*

Representa o número de eventos em um ano, que correspondem à interrupção no suprimento de energia elétrica.

$$LOLF = \frac{LOLF_t}{n} \quad (5.3)$$

Em que:

$LOLF$ – Valor esperado da frequência de interrupções (nº de eventos/ano).

$LOLF_t$ – Valor esperado da frequência de interrupções acumulada ao longo do período de análise (nº de eventos).

n – número de estágios do período de análise.

a.4) Probabilidade de Perda de Carga – *Loss of Load Probability (LOLP)*

Representa a relação entre o valor esperado da indisponibilidade e o número de horas em um ano.

$$LOLP = \frac{LOLE}{8.760} \quad (5.4)$$

Em que:

LOLP - Probabilidade de perda de carga

b) Avaliação Econômica – Custos, Receitas e Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido

O método do Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido, descrito por Castro e Mello (2003), De Mello (2008), apresenta a formulação mostrada no Quadro 5.1, a seguir, considerando uma base mensal:

+ receita com a prestação do serviço de transmissão de energia elétrica
- parcela variável por indisponibilidade
- impostos sobre faturamento
= receita operacional
+ receita operacional
- custos operacionais
= lucro mensal da gestão do negócio
+ lucro mensal da gestão do negócio
- depreciação
= lucro operacional
+ lucro operacional
- imposto de renda e de contribuição social
= lucro líquido
+ lucro líquido
+ depreciação
= fluxo de caixa operacional líquido
+ fluxo de caixa operacional líquido
- custos de investimento
= valor presente do fluxo de caixa líquido

Quadro 5.1 – Formulação do método do valor presente do fluxo de caixa líquido.
Fonte: Nuñez (2004).

A receita com a venda de energia elétrica é obtida com base na Receita Anual Permitida (RAP), para as empresas de transmissão (ANEEL, 2007b). A Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI) é calculada conforme equação a seguir (ANEEL, 2007a).

$$PVI = \frac{PB}{1.440D} K_p \left(\sum_{i=1}^{N_p} DVDP_i \right) + \frac{PB}{1.440D} \left(\sum_{i=1}^{N_o} K_{o_i} DVOD_i \right) \quad (5.5)$$

Em que:

PVI – Parcela variável por indisponibilidade (R\$).

PB – Pagamento base pela venda de energia elétrica (R\$/mês).

$$PB = RAP/12$$

D – Número de dias do mês da ocorrência.

$\sum DVDP$ – Somatório da duração verificada de desligamentos programados (min).

$\sum DVOD$ – Somatório da duração verificada de outros desligamentos (min).

K_p – Fator multiplicador para desligamentos programados (*K_p* = 10).

K_o – Fator multiplicados para outros desligamentos.

$$K_o = 150 \text{ até o } 300^\circ \text{ minuto e } K_o = K_p \text{ a partir do } 301^\circ \text{ minuto.}$$

N_p – Número de desligamentos programados ocorridos durante o mês.

N_o – Número de outros desligamentos ocorridos durante o mês.

Os impostos sobre o faturamento correspondem ao PIS - Programa de Integração Social e à COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social, conforme definidos em Castro e Mello (2003) e De Mello (2008), sendo estabelecidos, para o PIS, o percentual de 1,65 %, pela Lei nº 10.637 de 30 de dezembro de 2002 (BRASIL, 2002) e para a COFINS, o percentual de 7,6 %, pela Lei nº 10.833 de 29 de dezembro de 2003 (BRASIL, 2003).

Os custos operacionais são compostos pelas seguintes parcelas:

- Custos de Administração e Operação do Equipamento: segundo Nuñez (2004), essa parcela de custos é minoritária, sendo considerada fixa ao longo do período.
- Custos de Inspeção e Manutenção do Equipamento: consideram-se nessa parcela, os custos referentes às atividades de inspeção e de manutenção preventiva do equipamento, levando-se em conta, o valor e o número de homens/hora necessários, equipamentos utilizados, transporte, diárias, etc. Esses custos apresentam uma parcela fixa e uma parcela que depende do tempo de execução das atividades, conforme a Equação 5.6.

$$C_{im} = a \times t + b \quad (5.6)$$

Em que:

C_{im} – custos de inspeção e manutenção.

a – parcela referente ao custo variável de inspeção e manutenção (R\$/min).

t – duração da atividade de manutenção (min).

b – parcela referente ao custo fixo de inspeção e manutenção (R\$).

- Custos da Falha do Equipamento: consideram os custos da manutenção corretiva, calculados de forma semelhante aos custos de inspeção e manutenção preventiva e os custos associados ao não suprimento de energia, devido à uma falha terminal, dependentes também do tempo de indisponibilidade do equipamento. No caso da falha terminal, deve-se agregar ao custo da falha, a parcela fixa referente ao custo de investimento na compra de um equipamento novo.

A depreciação tem por objetivo considerar a perda do valor do equipamento, por deterioração ou obsolescência, ao longo do tempo de operação do mesmo. Segundo Castro e Mello (2003), a depreciação não pode ser considerada como uma despesa, no entanto a legislação fiscal permite sua consideração para a redução da base de cálculo para o imposto de

renda e para a contribuição social. Na análise econômica adotada nesse trabalho, a depreciação é definida como uma parcela constante, descontada ao longo do período de vida útil do equipamento. Por fim, incidem sobre o lucro operacional, o imposto de renda e a contribuição social, definidos atualmente em 25 % e 9 %, respectivamente (Castro e Mello, 2003).

A taxa de desconto utilizada para levar a valor presente todas as parcelas componentes do fluxo de caixa pode ser definida, segundo De Mello (2008), levando-se em conta as oportunidades de investimento no mercado de capitais. O autor apresenta também a possibilidade de se utilizar como taxa de desconto, o custo do capital próprio do setor elétrico, parâmetro que considera os riscos associados ao negócio e ao mercado, os riscos regulatórios e o desempenho da economia, além do valor do dinheiro no tempo. No referido trabalho, apresenta-se uma tabela com valores de 5,6 %, 10,4 %, 12,2 % e 13,6 %, para o custo do capital próprio, obtidos conforme metodologia apresentada na Nota Técnica nº 302/2006-SER/ANEEL (ANEEL, 2006), levando-se em conta quatro cenários distintos, quanto aos riscos considerados.

O Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido é obtido pela Equação 5.7:

$$VPFCL = \sum_{t=1}^n FC_t \times (1 + r)^{-t} \quad (5.7)$$

Em que:

$VPFCL$ – valor presente do fluxo de caixa líquido (R\$).

FC_t – saldo entre a receita e o desembolso no período t (R\$).

r – taxa de desconto mensal.

n – número de estágios do período de análise.

5.7 O Módulo 2 do Modelo de Aplicação

Apresentam-se no Quadro 5.2, as variáveis de entrada e de saída do módulo 2 do

modelo de aplicação, implementado na forma de um sistema especialista *fuzzy*.

Variáveis Numéricas de Entrada	Variáveis Linguísticas de Saída
- concentrações de gases - tempo até a falha terminal - custo da falha terminal	- condição do equipamento - nível de risco da falha terminal - linhas de ação plausíveis

Quadro 5.2 – Variáveis de entrada e de saída do módulo 2.

A condição do equipamento e o nível de risco da falha terminal são avaliados seguindo o raciocínio aproximado característico dos sistemas especialistas *fuzzy*, resultando em um conjunto de linhas de ação que devem orientar a tomada de decisão quanto ao gerenciamento do ciclo de vida do mesmo. As tarefas de avaliação das condições do equipamento, do nível de risco da falha terminal e de proposição de linhas de ação plausíveis, executadas por esse módulo, são descritas a seguir.

5.7.1 Avaliação da Condição do Equipamento por Meio do Diagnóstico de Falhas Incipientes

Na Subseção 2.5.1, destacou-se o acompanhamento das condições operativas de um equipamento como forma de definir ações que evitem as eventuais falhas. Esse acompanhamento deve passar pela investigação da condição da isolação sólida e líquida do equipamento, associada à deterioração do próprio equipamento.

Na metodologia proposta, utilizam-se versões *fuzzy* dos métodos NBR-7274, Doernenburg e Duval, combinados com o conhecimento heurístico dos especialistas, apresentados em Duval (1989) e em Milasch (1984), visando investigar as condições da isolação de um transformador de força, sob o ponto de vista da existência e identificação da natureza de falhas incipientes. Na Figura 5.6 ilustra-se o procedimento para o diagnóstico *fuzzy* de falhas incipientes.

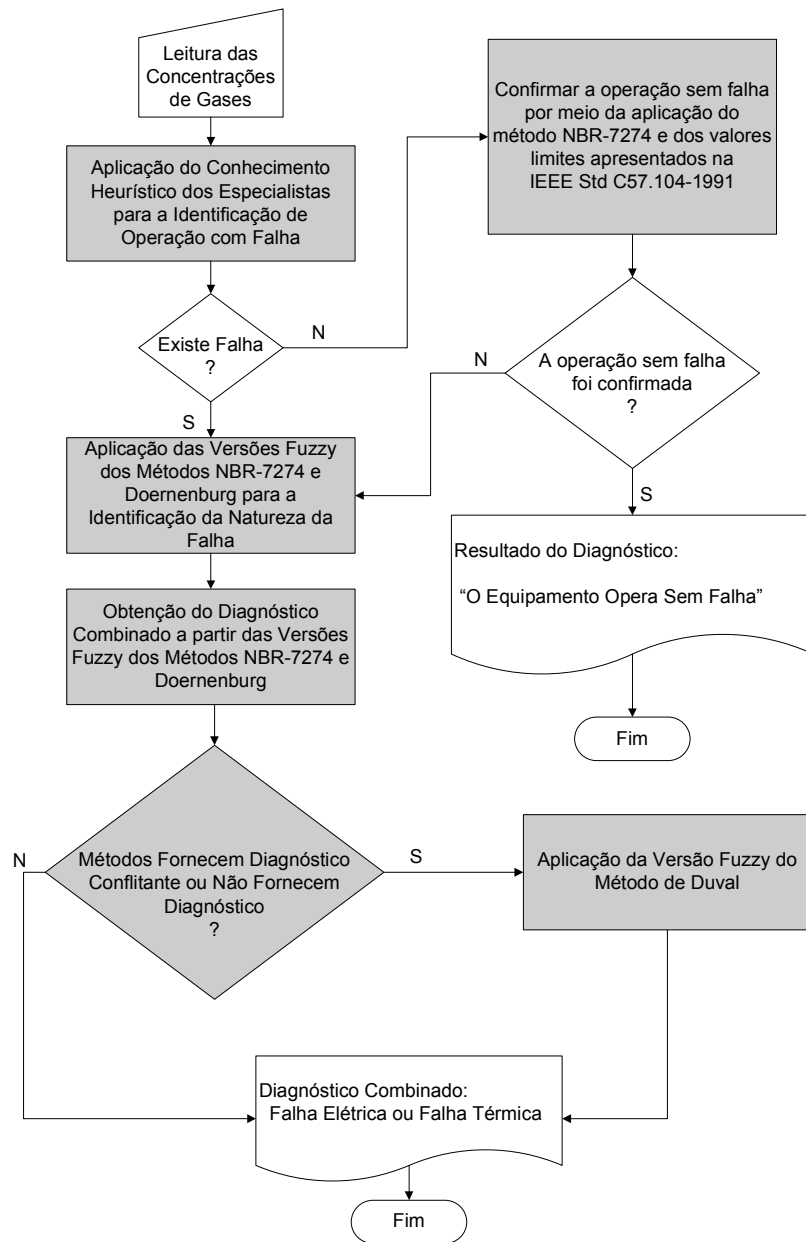


Figura 5.6 – Fluxograma do processo de diagnóstico *fuzzy* de falhas incipientes.

Conforme o fluxograma da Figura 5.6, a aplicação do conhecimento heurístico deve permitir uma indicação inicial de operação com ou sem falha. Se a indicação for de operação sem falha, tal situação deve ser confirmada pela aplicação do método NBR-7274 ou dos

valores limites para operação normal, apresentados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Caso a operação sem falha não se confirme, assume-se uma condição de operação com falha.

Com a indicação de operação com falha, deve-se recorrer inicialmente, às versões *fuzzy* dos métodos da NBR-7274 e Doernenburg para a identificação da natureza dessa falha. Nas situações em que os diagnósticos fornecidos pelos dois métodos forem conflitantes ou quando não for possível a obtenção de um diagnóstico por ambos os métodos, a inferência é direcionada para o método de Duval, visando a busca de um diagnóstico definitivo.

A seguir, descrevem-se as etapas do processo de inferência em destaque no fluxograma mostrado anteriormente. Serão apresentados alguns modelos de regras implementadas para a execução das tarefas destinadas ao módulo 2, bem como as funções de pertinência de algumas variáveis, para mostrar que o diagnóstico de falhas é baseado em valores numéricos de entrada, que orientam a conversão das variáveis numéricas originais em variáveis linguísticas, com termos linguísticos e graus de pertinência associados.

a) Aplicação do Conhecimento Heurístico dos Especialistas

Para a etapa inicial do diagnóstico de falhas incipientes, deve-se considerar, de acordo com Lúcio e Teive (2008), o conhecimento heurístico apresentado em Duval (1989) que estabelece valores aceitáveis para as concentrações dos gases acetileno (20 ppm), etileno (500 ppm) e hidrogênio (200 ppm) e em Milasch (1984) que apresenta uma faixa entre 3 e 10, como aceitável para a relação entre os gases dióxido de carbono e monóxido de carbono. Para diagnosticar a condição de operação do equipamento, por meio do conhecimento heurístico, os modelos de regras mostrados na Figura 5.7 foram implementados, considerando-se a conversão das concentrações de acetileno, etileno, hidrogênio e a relação entre dióxido de carbono e monóxido de carbono, em variáveis linguísticas.

<p>Se Concentração de Acetileno é Baixa e Concentração de Etileno é Baixa e Concentração de Hidrogênio é Baixa e Relação Dióxido/Monóxido é Aceitável</p> <p>Então Equipamento opera Sem Falha</p> <p>Se Concentração de Acetileno não é Baixa ou Concentração de Etileno não é Baixa ou Concentração de Hidrogênio não é Baixa ou Relação Dióxido/Monóxido não é Aceitável</p> <p>Então Equipamento opera Com Falha</p>
--

Figura 5.7 – Modelos de regras para a aplicação do conhecimento heurístico.

Na Figura 5.8 ilustra-se como exemplo, a função de pertinência para a variável que representa a concentração de acetileno. Observa-se que uma concentração de acetileno igual ou inferior a 15 ppm é considerada “Baixa”, com grau de pertinência (μ) unitário, ou seja, com 100 % de certeza, esses valores são compatíveis com o conjunto *fuzzy* “Baixa”. Para valores superiores a 15 ppm e inferiores a 35 ppm a concentração é considerada “Baixa”, com grau de pertinência inferior ao valor unitário e para um valor igual ou superior a 35 ppm, a concentração de acetileno não apresenta compatibilidade com o conjunto *fuzzy* que representa o termo linguístico “Baixa”.

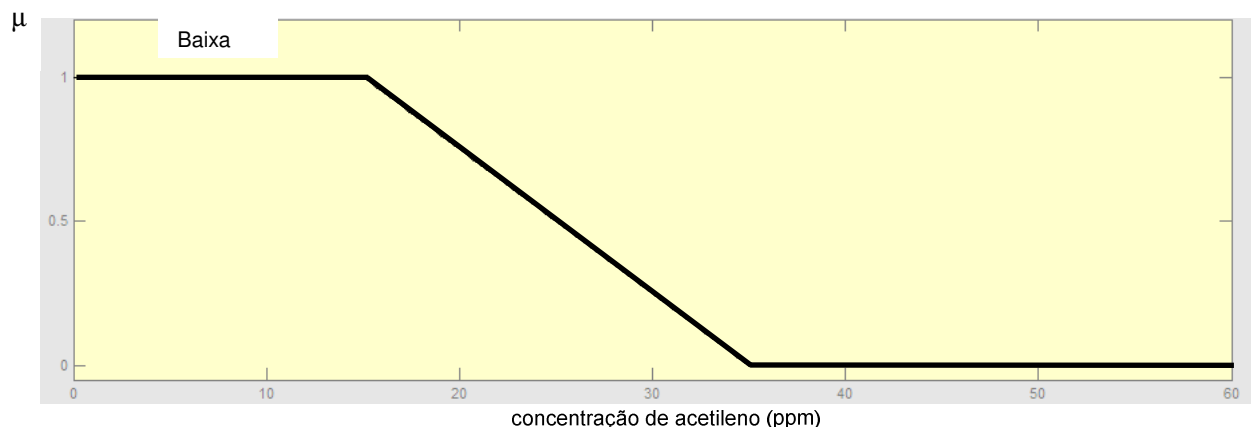


Figura 5.8 – Função de pertinência para a variável “concentração de acetileno” – Aplicação do conhecimento heurístico.

Observa-se assim, quanto à aplicação do conhecimento heurístico, que a condição necessária para que as regras apresentadas na Figura 5.7 sejam disparadas, é que os respectivos antecedentes sejam satisfeitos, com grau de pertinência não nulo. Essa observação é válida também para as demais etapas do processo de diagnóstico.

No caso em que o conhecimento heurístico apontar para a operação sem falha, deve-se buscar a confirmação desse estado operativo por meio do método NBR-7274 ou do guia IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991), que estabelece valores limites para as concentrações de hidrogênio (100 ppm), metano (120 ppm), acetileno (35 ppm), etileno (50 ppm), etano (65 ppm), monóxido de carbono (350 ppm) e dióxido de carbono (2.500 ppm). Assim, após a conversão dessas variáveis numéricas em variáveis linguísticas, as regras mostradas na Figura 5.9, permitem confirmar a operação sem falha.

**Se Diagnóstico pelo conhecimento heurístico é de operação Sem Falha e
Diagnóstico pelo método NBR-7274 é de operação Sem Falha**

Então Confirma-se a operação Sem falha

**Se Diagnóstico pelo conhecimento heurístico é de operação Sem Falha e
Concentração de hidrogênio é menor que 100 ppm e
Concentração de metano é menor que 120 ppm e
Concentração de acetileno é menor que 35 ppm e
Concentração de etileno é menor que 50 ppm e
Concentração de etano é menor que 65 ppm e
Concentração de monóxido de carbono é menor que 350 ppm e
Concentração de dióxido de carbono é menor que 2500 ppm**

Então Confirma-se a operação Sem Falha

Figura 5.9 – Modelos de regras para a confirmação de operação sem falha.

Como exemplo, na Figura 5.10 apresenta-se a função de pertinência para a variável que representa a concentração de monóxido de carbono.

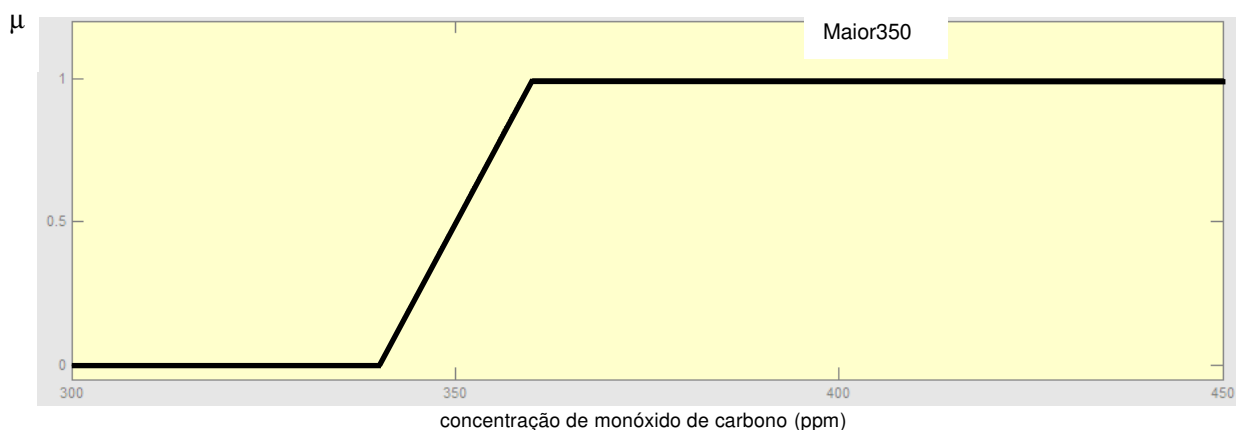


Figura 5.10 – Função de pertinência para a variável “concentração de monóxido de carbono”.

Para a concentração de monóxido de carbono, somente um valor igual ou superior a 360 ppm é considerado pertencente ao conjunto *fuzzy* “Maior350”, com grau de pertinência unitário.

b) Aplicação das Versões *Fuzzy* dos Métodos NBR-7274 e Doernenburg

Os resultados apresentados por Moraes (2004), Zirbes, Rolim e Zürn (2005) e Lúcio e Teive (2008) demonstram a possibilidade de aumento do percentual de acerto no diagnóstico de falhas incipientes em transformadores, por meio de técnicas de Inteligência Artificial, da Lógica *Fuzzy* e da combinação dos resultados fornecidos por diversos métodos. Caso não se confirme a operação sem falha, deve-se aplicar as versões *fuzzy* dos métodos de análise de gases, visando identificar a natureza da falha.

As versões originais dos métodos de análise de gases apresentam como resultado, a identificação da natureza da falha, bem como o grau de intensidade da mesma. Por uma questão de simplificação, as versões *fuzzy* incorporadas à metodologia proposta identificam as falhas apenas por sua natureza (falha elétrica ou falha térmica), sem considerar a intensidade com a qual as mesmas ocorrem. Modelos de regras implementados para as versões *fuzzy* dos

dois métodos são apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12, a seguir.

Se relação acetileno/etileno é BAIXA
Então Código 1 é ZERO

Se relação metano/hidrogênio é MÉDIA1
Então Código 2 é ZERO

Se relação etileno/etano é MÉDIA2
Então Código 3 é UM

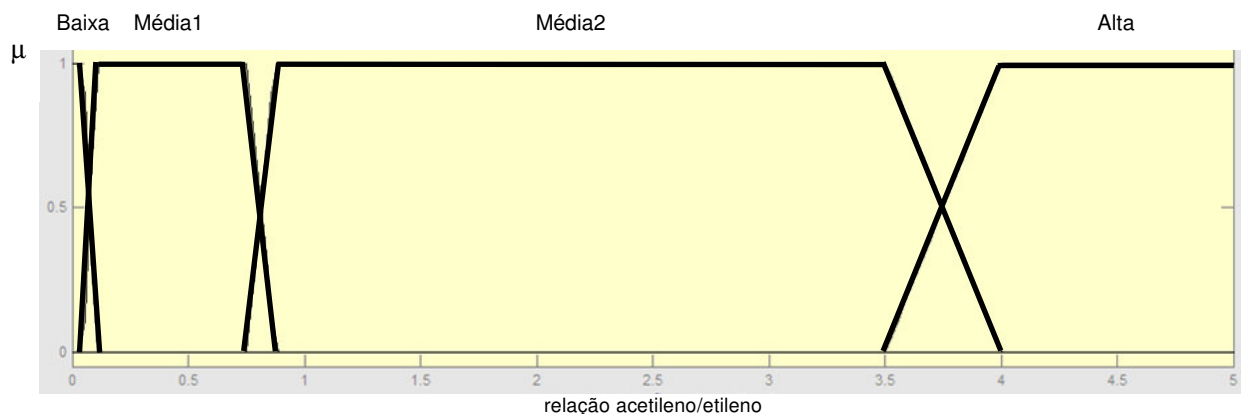
Se
 Código 1 é ZERO e
 Código 2 é ZERO e
 Código 3 é UM
Então
 Diagnóstico NBR-7274 é de Falha Térmica

Figura 5.11 – Modelos de regras para diagnosticar a natureza da falha pelo método NBR-7274.

Se relação metano/hidrogênio é MAIOR QUE 1 e
 relação acetileno/etileno é MENOR QUE 0,75 e
 relação etano/acetileno é MAIOR QUE 0,4 E
 relação acetileno/etileno é MENOR QUE 0,3
Então
 Diagnóstico Doernenburg é de Falha Térmica

Figura 5.12 – Modelo de regra para diagnosticar a natureza da falha pelo método de Doernenburg.

Na Figura 5.13 apresentam-se as funções de pertinência para as variáveis que representam as relações de gases acetileno/etileno e etano/acetileno, utilizadas respectivamente nos métodos NBR-7274 e Doernenburg.



(a) relação acetileno/etileno.



(b) relação etano/acetileno.

Figura 5.13 – Funções de pertinência para as variáveis “relação acetileno/etileno” e “relação etano/acetileno”.

A relação acetileno/etileno é considerada “Baixa” com grau de pertinência unitário, para um valor igual ou inferior a 0,05. Valores superiores a 0,05 e inferiores a 0,1 apresentam grau de pertinência inferior ao valor unitário, nesse conjunto *fuzzy*, pois nesse intervalo, caracterizado como uma região de incerteza, os valores numéricos apresentam compatibilidade

também com o termo linguístico, ou conjunto *fuzzy* “Média1”. Valores numéricos superiores a 3,5 e inferiores a 4 caracterizam também uma região de incerteza associada aos conjuntos *fuzzy* “Média2” e “Alta”.

Já a relação etano/acetileno é “Menor04”, ou seja, apresenta valor menor que 0,4, com grau de pertinência unitário, para um valor igual ou inferior a 0,35. A região de incerteza entre os conjuntos *fuzzy* “Menor04” e “Maior04”, corresponde a valores numéricos superiores a 0,35 e inferiores a 0,45. Para valores superiores a 0,45, a relação etano/acetileno já é considerada maior que 0,4, com grau de pertinência unitário.

c) Obtenção do Diagnóstico Combinado

Para o diagnóstico combinado, os resultados fornecidos pelas versões *fuzzy* dos métodos NBR-7274 e Doernenburg são utilizados em regras do tipo:

Se Diagnóstico NBR-7274 é de Falha Térmica e Diagnóstico Doernenburg é de Falha Térmica Então Diagnóstico combinado é de Falha Térmica

Figura 5.14 - Modelo de regra para o diagnóstico combinado.

De acordo com essa regra, o módulo 2 fornece diagnóstico combinado de falha térmica, caso os diagnósticos fornecidos pelas versões *fuzzy* dos métodos NBR-7274 e Doernenburg, sejam de falha térmica, caracterizando uma situação de diagnósticos coincidentes.

Já foi comentado que no caso de diagnósticos conflitantes ou de impossibilidade de obtenção de um diagnóstico pelos dois métodos anteriores, deve-se buscar um diagnóstico definitivo pela aplicação da versão *fuzzy* do método de Duval. Para a implementação desse

método, as faixas de valores percentuais característicos da versão original, apresentadas na Tabela A.5 do Anexo 1, foram convertidas em termos linguísticos, originando a Tabela 5.1, a seguir.

Tipo de Falha	<i>m</i>	<i>a</i>	<i>y</i>
Pontos Quentes	Faixa1	Faixa1	Faixa1
Arco de Alta Energia	Faixa2	Faixa2	Faixa2
Arco de Baixa Energia	Faixa3	Faixa3	Faixa3
Descargas Internas	Faixa4	Faixa4	Faixa4

Tabela 5.1 – Diagnóstico de falhas, utilizando a versão *fuzzy* do método de Duval.
Adaptada de Duval (1989).

Na Tabela 5.1, *m*, *a* e *y* representam as quantidades percentuais de metano, acetileno e etileno, respectivamente, caracterizadas como variáveis linguísticas e não mais como variáveis numéricas, como na Tabela A.5.

Na Figura 5.15 ilustra-se um modelo de regra para a aplicação da versão *fuzzy* do método de Duval, para a obtenção de um diagnóstico nos casos de conflito ou de impossibilidade de obtenção de um diagnóstico pelas versões *fuzzy* dos métodos NBR-7274 e Doernenburg.

<p>Se</p> <p>Diagnóstico NBR-7274 é de Falha Elétrica e Diagnóstico Doernenburg é de Falha Térmica e Quantidade Percentual de Metano é Faixa1 Quantidade Percentual de Acetileno é Faixa1 Quantidade Percentual de Etileno é Faixa1</p> <p>Então</p> <p>Diagnóstico combinado é de Falha Térmica</p>
--

Figura 5.15 – Modelo de regra para diagnosticar a natureza da falha pelo método de Duval.

5.7.2 Considerações Adicionais sobre o Diagnóstico de Falhas Incipientes

Durante a execução do módulo 2 para o diagnóstico de falhas incipientes, uma regra será disparada sempre que a(s) proposição(ões) correspondente(s) ao antecedente da mesma for(em) satisfeita(s) com grau de pertinência superior a zero ou pelo menos igual a um limite mínimo definido pelo usuário. Nesse ponto destaca-se a importância da leitura do Apêndice 1, que apresenta um exemplo de aplicação desse módulo, visando ilustrar o encadeamento de regras, característico de um sistema especialista *fuzzy*.

Os parâmetros de todas as funções de pertinência associadas às variáveis envolvidas no processo de diagnóstico de falhas foram ajustados, por meio da observação do percentual de diagnósticos corretos referentes à aplicação do módulo 2 a um conjunto de concentrações de gases que compõem o banco de dados IEC TC 10, publicado por Duval e De Pablo (2001).

Para a tarefa de diagnóstico de falhas incipientes, foram implementadas 77 regras, sendo 2 para a aplicação do conhecimento heurístico, 3 para a confirmação de operação sem falha, 35 para a aplicação do método da NBR-7274, 10 para a aplicação do método de Doernenburg, 11 para o método de Duval e 16 para a obtenção do diagnóstico combinado.

5.7.3 Avaliação do Nível de Risco da Falha Terminal

Com base no exposto por Oliveira (2003), avalia-se o nível de risco da falha terminal do equipamento, combinando a possibilidade da ocorrência dessa falha, com os prejuízos resultantes. Na metodologia proposta, a possibilidade de ocorrência de uma falha terminal é avaliada pela estimativa do tempo até a ocorrência dessa falha, por meio do método *First Passage Time*, visto na Subseção 5.6.1. A estimativa do tempo até a falha terminal permite o cálculo dos prejuízos financeiros, a partir do valor presente do custo da falha terminal, levando-se em conta o tempo de indisponibilidade com a falha e aspectos como o não suprimento de energia, a compra de um equipamento novo, lesões fatais ou graves em pessoas,

impacto ambiental, entre outros.

A estimativa do nível de risco da falha terminal deve ser realizada por meio de um processo de inferência que emule o raciocínio qualitativo efetuado pelos especialistas e nesse caso, tanto o tempo até a falha, como o custo da falha devem ser tratados como variáveis linguísticas, utilizando-se os termos “Muito Curto”, “Curto”, “Moderado”, “Longo” e “Muito Longo”, para o tempo e “Muito Pequeno”, “Pequeno”, “Moderado”, “Grande” e “Muito Grande”, para o custo. Como resultado, o nível de risco é também caracterizado como uma variável linguística, por meio dos termos “Muito Baixo”, “Baixo”, “Tolerável”, “Grave”, “Muito Grave”.

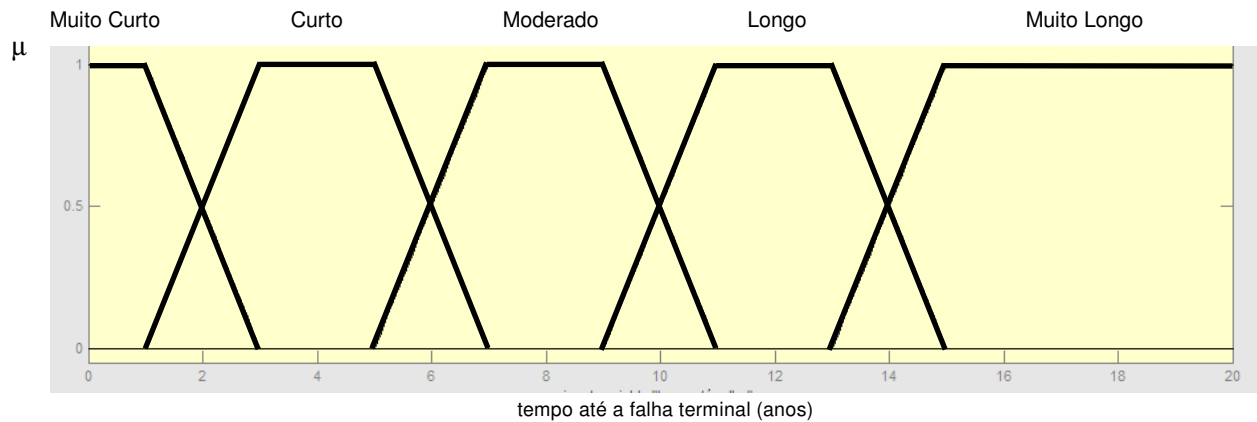
No modelo de aplicação, o processo de inferência para a avaliação do nível de risco da falha ocorre pela aplicação de regras como a mostrada a seguir.

Se
Tempo até a falha é Longo ou Muito Longo e
Custo da falha é Grande
Então
Nível de risco da falha pelo tempo até a falha é Tolerável

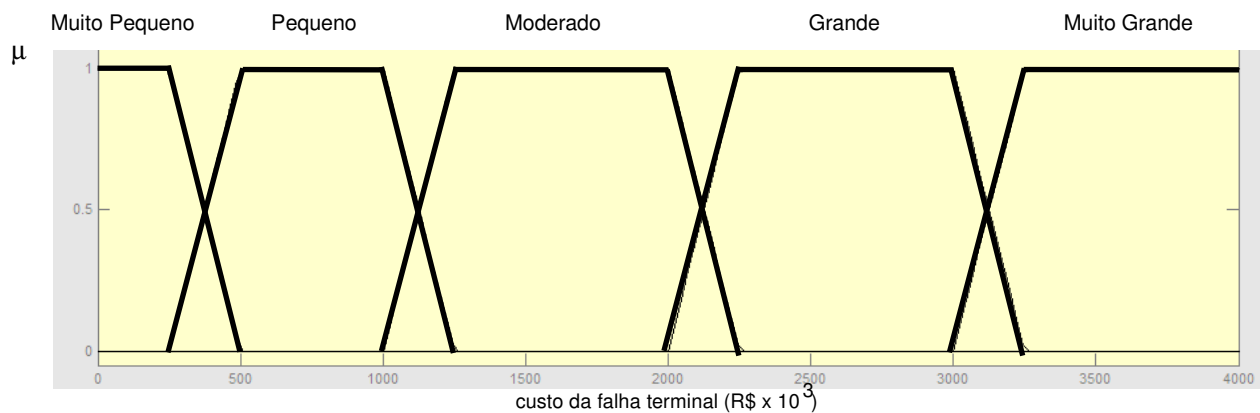
Figura 5.16 – Modelo de regra para a avaliação do nível de risco da falha terminal.

As funções de pertinência para o tempo até a falha terminal e para o custo da falha terminal, que aparecem no antecedente da regra mostrada na Figura 5.16, são apresentadas na Figura 5.17. O tempo até a falha terminal é considerado “Muito Longo”, com grau de pertinência unitário, para um valor igual ou superior a 15 anos. Para valores superiores a 13 e inferiores a 15, existe a incerteza entre os conjuntos *fuzzy* “Longo” e “Muito Longo”. O custo da falha é considerado “Grande”, com grau de pertinência unitário, para valores entre R\$ 2.250.000,00 e R\$ 3.000.000,00 e valores superiores a R\$ 3.000.000,00 e inferiores a R\$

3.250.000,00 estão em uma região de incerteza associada aos conjuntos *fuzzy* “Grande” e “Muito Grande”.



(a) Tempo até a falha terminal.



(b) Custo da falha terminal.

Figura 5.17 – Funções de pertinência para as variáveis “tempo até a falha terminal” e “custo da falha terminal”.

5.7.4 Proposição de Linhas de Ação Plausíveis

Com base no diagnóstico de falhas incipientes e na estimativa de nível de risco da falha terminal, o módulo 2 fornece as linhas de ação a serem seguidas para a definição de estratégias

de ação para o gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força. Essas linhas de ação devem orientar para a permanência da estratégia tradicional, ou para a adoção de estratégias alternativas, com intervalos maiores ou menores entre manutenções, atividades mais ou menos efetivas ou até mesmo para a substituição do equipamento. Espera-se que as estratégias geradas com base nas linhas de ação possam eliminar a falha incipiente eventualmente identificada e, pelo menos, levar o risco da falha para o nível “Tolerável”.

No Quadro 5.3, a seguir, são listadas as linhas de ação em função da avaliação do nível de risco da falha terminal do equipamento. As linhas de ação do grupo 1 estão relacionadas a um diagnóstico de operação com falha ou a uma avaliação de nível de risco “Grave” ou “Muito Grave”. Já as linhas de ação do grupo 2 consideram operação sem falha e nível de risco “Muito Baixo”, “Baixo” ou “Tolerável”.

Grupo 1 Operação com Falha ou Nível de Risco da Falha Terminal Grave ou Muito Grave	Grupo 2 Operação sem Falha e Nível de Risco da Falha Terminal Muito Baixo, Baixo ou Tolerável
<ul style="list-style-type: none">• manter o equipamento em operação e continuar com a estratégia tradicional de manutenção;• manter o equipamento em operação e diminuir o intervalo entre manutenções preventivas;• retirar imediatamente o equipamento para manutenção e continuar com a estratégia tradicional;• retirar imediatamente o equipamento para manutenção e reduzir a periodicidade da manutenção;• retirar o equipamento para manutenção após um tempo definido e continuar com a estratégia tradicional;• retirar o equipamento para manutenção após um tempo definido e reduzir a periodicidade da manutenção;• substituir imediatamente ou antecipar a substituição do equipamento.	<ul style="list-style-type: none">• manter o equipamento em operação e continuar com a estratégia tradicional de manutenção;• manter o equipamento em operação e aumentar o intervalo entre manutenções preventivas;• manter o equipamento em operação e suspender a manutenção preventiva;• postergar a substituição do equipamento.

Quadro 5.3 – Linhas de ação plausíveis fornecidas pelo módulo 2.

Algumas considerações quanto às linhas de ação propostas pelo módulo 2 do modelo de aplicação devem ser feitas nesse ponto: 1º) Quando se propõe a retirada do equipamento para a manutenção, deve-se considerar que o mesmo poderá ser substituído temporariamente, por um equipamento reserva, existente na própria subestação ou em uma subestação vizinha, o que deve ter influência direta no tempo de indisponibilidade de suprimento; 2º) Nas situações de manutenção, quando não existir equipamento reserva, a indisponibilidade de suprimento se dá durante todo o período de manutenção do equipamento existente; 3º) A substituição do equipamento deve ser feita de forma definitiva e o tempo estabelecido para tal ação, ou seja, substituir imediatamente, antecipar a substituição ou postergar a substituição, deve ter influência direta no custo de investimento, caso um novo equipamento tenha que ser adquirido.

Apresenta-se nesse ponto, a diferença entre uma linha de ação e uma estratégia de ação a ser definida. Em outras palavras, uma linha de ação estabelece uma direção a ser seguida, como por exemplo, reduzir a periodicidade da manutenção preventiva e uma estratégia de ação define de forma mais detalhada tal ação, como por exemplo, reduzir imediatamente a periodicidade da manutenção preventiva de seis para quatro anos. Além disso, uma estratégia de ação pode ser composta por uma composição de linhas de ação, como por exemplo, substituir imediatamente o equipamento e aumentar a periodicidade da manutenção preventiva de três para cinco anos.

5.8 O Módulo 3 do Modelo de Aplicação

A avaliação estratégica é baseada na construção de um mapa causal *fuzzy*, conforme proposta de Lúcio e Teive (2007b), sendo o módulo 3 implementado como um sistema de inferência *fuzzy*, o que requer a definição de termos linguísticos e de funções de pertinência para as variáveis apresentadas no Quadro 5.4.

Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída
- intensidades das relações de influência entre os conceitos do mapa causal.	- efeitos das estratégias de ação sobre o cumprimento da missão da empresa.

Quadro 5.4 – Variáveis de entrada e de saída do módulo 3.

Para a transformação de um mapa causal em mapa *fuzzy*, atribuem-se para as variáveis listadas no Quadro 5.4, os termos linguísticos “Muito Fraco”, “Fraco”, “Moderado”, “Forte” e “Muito Forte”. Cada um desses termos é representado por uma função de pertinência, o que permite que a intensidade da relação de causa-efeito entre dois conceitos de um mapa causal, seja rotulada com grau de certeza igual ou inferior a 100 %.

Com o módulo 3 é dado um caráter estratégico ao processo de avaliação, já que o objetivo é verificar, por meio de um conjunto de regras linguísticas, o efeito de cada estratégia de ação sobre o cumprimento da missão da empresa. A construção e utilização de um mapa causal *fuzzy*, como instrumento para o processo de inferência, permite a consideração das preferências dos decisores quanto ao grau de importância de cada aspecto de avaliação inserido no mapa na forma de um conceito.

Desse modo, a avaliação assume uma abordagem subjetiva e permite a incorporação da avaliação ambiental das estratégias de ação.

5.8.1 Formulação do Processo de Inferência Causal

A formulação do processo de inferência causal em um mapa *fuzzy*, conforme Lúcio e Teive (2007b), busca a avaliação dos efeitos parciais e do efeito total de cada estratégia sobre o cumprimento da missão da empresa, utilizando-se os operadores **min** e **max** (ver Subseção 4.7.4), conforme apresentado a seguir, para um mapa causal *fuzzy* composto por quatro conceitos, mostrado na Figura 5.18.

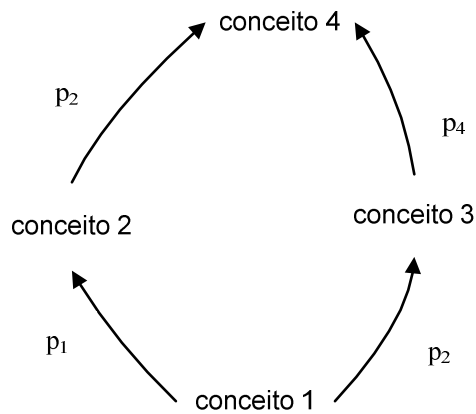


Figura 5.18 – Mapa causal *fuzzy* composto por quatro conceitos.

Para cada ligação entre os conceitos do mapa causal, tratada como uma variável *fuzzy*, atribui-se uma intensidade pertencente a um conjunto de termos linguísticos ordenados de forma crescente, $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$. Considerando-se, no mapa da Figura 5.18, que o conceito 1 represente uma estratégia de ação, sendo chamado de conceito-ação e que o conceito 4 represente a missão da empresa, sendo chamado de conceito-missão, sendo os conceitos 2 e 3 intermediários e denominados de conceitos-meio, tem-se dois caminhos alternativos entre a estratégia e a missão da empresa.

Os efeitos parciais da estratégia de ação sobre o cumprimento da missão da empresa, considerando cada uma das linhas de argumentação alternativas são obtidos como segue.

a) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-missão, passando pelo caminho 1-2-4:

$$EP_{1-2-4} = \min\{p_1, p_2\} = p_1$$

b) Efeito parcial do conceito-ação sobre o conceito-missão, passando pelo caminho 1-3-4:

$$EP_{1-3-4} = \min\{p_2, p_4\} = p_2$$

O efeito total do conceito-ação sobre o conceito-missão deve ser obtido por:

$$ET_{1-4} = \max\{EP_{1-2-4}, EP_{1-3-4}\} = \max\{p_1, p_2\} = p_2$$

O operador **min** foi implementado no módulo 3, pelo seguinte modelo de regra:

Se Intensidade da ligação entre os conceitos 1 e 2 é p_1 e
Intensidade da ligação entre os conceitos 2 e 4 é p_2
Então Efeito parcial passando pelo caminho 1-2-4 é p_1

Figura 5.19 – Modelo de regra para a implementação do operador “min”.

De acordo com a Lógica *Fuzzy*, pode-se determinar o grau de pertinência com o qual a proposição “efeito parcial passando pelo caminho 1-2-4 é p_1 ”, que corresponde ao consequente da regra mostrada na Figura 5.19 é verdadeiro, com base na operação de intersecção de conjuntos *fuzzy*, definida matematicamente pelo operador “min”.

Desse modo, o grau de pertinência com o qual o consequente da regra é verdadeiro, só será unitário, se as proposições que compõem o antecedente da regra forem verdadeiras, também com grau de pertinência unitário, o que caracteriza uma situação de inferência sem incerteza. Nos casos em que, pelo menos uma das duas proposições que compõem o antecedente da regra apresentar grau de certeza inferior a 100 % (grau de pertinência inferior ao unitário), o grau de pertinência da proposição que representa o consequente da regra será igual ao menor dos graus de pertinência apresentados pelas proposições do antecedente.

Na Subseção 5.8.5, descreve-se de que forma se pode tratar as incertezas quanto à definição das intensidades das relações de influência entre conceitos de um mapa *fuzzy*.

5.8.2 Construção de um Mapa Causal Segundo a Metodologia Proposta

Conforme apresentado na Subseção 3.5.2, o mapa causal deve ser construído por meio de um processo interativo entre facilitador e decisores, de modo que esses últimos possam explicitar aspectos considerados relevantes para o problema em questão. Desse modo, cabe ao facilitador, transformar tais aspectos em conceitos do mapa causal, buscando também, junto aos decisores, a relação de causa-efeito entre esses conceitos, até se atingir o último conceito do mapa, que no caso da metodologia proposta, deve representar a missão da empresa.

Os resultados fornecidos pelo módulo 1 (índices técnicos e econômicos de desempenho), certamente representam aspectos importantes sob o ponto de vista estratégico e por isso, propõe-se que o procedimento para a construção do mapa causal considere que tais índices sejam tratados como aspectos de avaliação estratégica, inseridos em um nível hierárquico do mapa, imediatamente após o conceito que representa a ação alternativa, na forma de conceitos-atributo, característicos do desempenho das estratégias de ação. Isso deve permitir que o processo de inferência causal inicie com informações numéricas relativas aos desempenhos das estratégias de ação e obtidas por meio da simulação da operação do equipamento, efetuada pelo módulo 1.

Assim, qualquer índice fornecido pelo módulo 1 pode ser convertido em um conceito-atributo, dependendo das preferências dos decisores quando da construção do mapa. Esses conceitos-atributo, relacionados aos aspectos tradicionais de avaliação, devem ser considerados em conjunto com os conceitos-atributo relacionados à avaliação ambiental, ampliando a abordagem multicritério dada ao problema.

5.8.3 Conversão de um Mapa Causal em Mapa Causal *Fuzzy*

Para que a avaliação estratégica seja executada, por meio de um processo de inferência causal, é necessário atribuir a cada relação de causa-efeito no mapa, um nível de intensidade

representado por um termo linguístico. Desse modo, utilizando-se o conjunto de termos linguísticos $P = \{\text{Muito Fraco, Fraco, Moderado, Forte, Muito Forte}\}$, cria-se, a partir do mapa causal original, um mapa causal *fuzzy*.

Deve-se observar que a criação do mapa *fuzzy* permite que os decisores expressem suas preferências quanto às intensidades das relações de causa-efeito entre os conceitos e nesse caso, ficam evidentes os caminhos (sequências de conceitos) ou linhas de argumentação, conforme definido em Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001), que apresentam maiores efeitos sobre o cumprimento da missão da empresa. Na metodologia proposta, tais caminhos são denominados linhas de argumentação principais e só podem ser identificados após a definição das intensidades de todas as relações de causa-efeito contidas no mapa.

5.8.4 Avaliação Estratégica Quantitativa

A consideração qualitativa dos efeitos totais de cada estratégia de ação sobre o cumprimento da missão da empresa, obtidos por meio do processo de inferência causal, pode não permitir a ordenação dessas estratégias. A ordenação de n estratégias de ação, pode ser orientada pelos valores numéricos obtidos para os efeitos ET_1, ET_2, \dots, ET_n , por meio da defuzzyficação dessas variáveis de saída, utilizando-se por exemplo, o método do centro de gravidade ou do centróide (Tanscheit, 2003).

Considerando-se que a variável linguística é caracterizada pelos termos linguísticos representados pelas funções de pertinência mostradas na Figura 5.20, conclui-se que, após a defuzzyficação, o valor numérico fornecido pelo sistema corresponde a um número real pertencente ao intervalo $[1, 5]$. Nesse caso, a estratégia de ação que apresentar valor numérico igual a “5” maximiza o efeito sobre o cumprimento da missão da empresa (efeito “Muito Forte”). Adicionalmente, verifica-se que a consideração do raciocínio incerto permite a obtenção de um resultado pertencente a uma das regiões de incerteza representadas pelos intervalos $(1, 2)$, $(2, 3)$, $(3, 4)$ e $(4, 5)$.

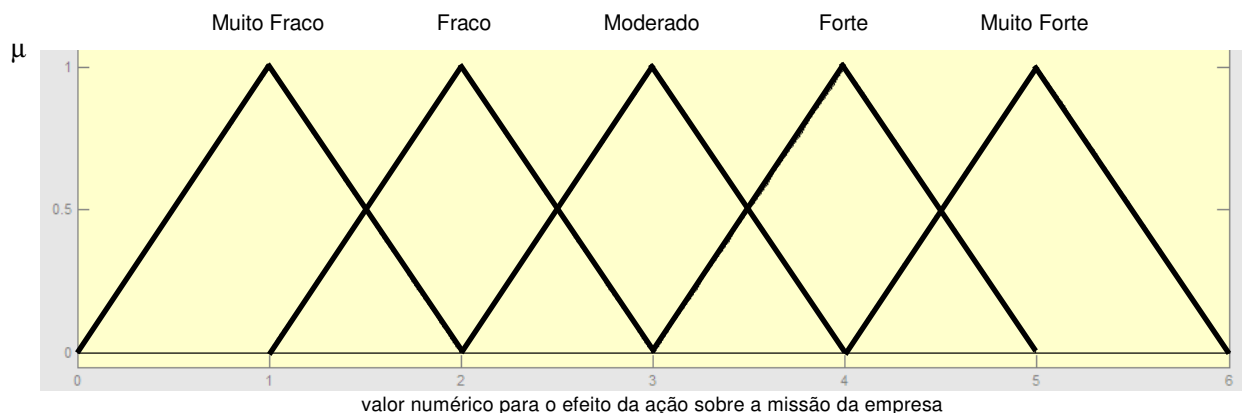


Figura 5.20 – Funções de pertinência para o efeito sobre a missão da empresa.

Na Tabela 5.2, apresenta-se a correspondência entre os termos associados à variável linguística que representa o efeito sobre o cumprimento da missão da empresa e os valores numéricos, obtidos após a defuzzyficação.

Termo Linguístico	Valor Numérico Correspondente (VN)	Termo Linguístico	Valor Numérico Correspondente (VN)
Muito Fraco	VN = 1	Moderado Forte	$3 < VN < 3,5$
Muito Fraco Fraco	$1 < VN < 1,5$	Moderado Forte	VN = 3,5
Muito Fraco Fraco	VN = 1,5	Moderado Forte	$3,5 < VN < 4$
Muito Fraco Fraco	$1,5 < VN < 2$	Forte	VN = 4
Fraco	VN = 2	Forte Muito Forte	$4 < VN < 4,5$
Fraco Moderado	$2 < VN < 2,5$	Forte Muito Forte	VN = 4,5
Fraco Moderado	VN = 2,5	Forte Muito Forte	$4,5 < VN < 5$
Fraco Moderado	$2,5 < VN < 3$	Muito Forte	VN = 5
Moderado	VN = 3		

Tabela 5.2 – Resultados possíveis para o processo de inferência.

Os intervalos correspondentes às regiões de incerteza estão em destaque e em cada intervalo, o termo linguístico associado aos maiores valores para o grau de pertinência está em negrito. Observando-se a Tabela 5.2, verifica-se que, na avaliação estratégica de duas ou mais estratégias de ação, situações caracterizadas por uma igualdade de desempenhos sob o ponto de vista qualitativo, podem ser resolvidas por meio da defuzzyficação e obtenção de valores numéricos para os desempenhos.

Por exemplo, considerando-se que duas estratégias de ação, E_1 e E_2 , tenham sido avaliadas, obtendo-se efeitos “Moderado/Forte” para ambas, a modelagem da inferência causal por meio de um sistema *fuzzy*, permitindo a defuzzyficação, pode contornar a situação de igualdade ou indiferença entre os efeitos, desde que os valores numéricos obtidos após a defuzzyficação sejam diferentes. Nesse caso, com base nas funções de pertinência apresentadas na Figura 5.20, a estratégia de ação que apresentar um valor numérico maior, deve ser considerada a de melhor desempenho, já que seu efeito sobre a missão da empresa terá grau de pertinência maior no conjunto “Forte”, do que o apresentado pela estratégia concorrente (ver exemplo de aplicação do módulo 3, no Apêndice 1).

5.8.5 Tratamento das Incertezas no Processo de Inferência Causal

Observa-se que a rotulação da intensidade da relação de influência entre dois conceitos de um mapa *fuzzy* aparece como fonte de incerteza no processo de inferência causal, mesmo com a utilização de termos linguísticos. Uma relação entre conceitos pode apresentar intensidade situada em uma região de incerteza, ou seja, pode ser rotulada com os termos Muito Fraco/Fraco, Fraco/Moderado, Moderado/Forte ou Forte/Muito Forte, com graus de pertinência distintos para cada rótulo ou conjunto *fuzzy*.

Nas ligações entre o conceito-ação e cada conceito-atributo, uma eventual rotulação incerta estará diretamente associada com o desempenho da estratégia de ação naquele aspecto de avaliação representado pelo conceito-atributo. No caso das demais ligações, a partir de cada

conceito-atributo, a incerteza estará associada com o julgamento dos decisores e a implementação do módulo 3 como um sistema *fuzzy* permite que nesse julgamento, sejam definidos, como informação de entrada, os graus de pertinência referentes a cada termo linguístico.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 5.21 um mapa causal *fuzzy* para o qual a rotulação das intensidades de duas relações entre conceitos (ligações 2-4 e 3-4) é caracterizada por um julgamento incerto.

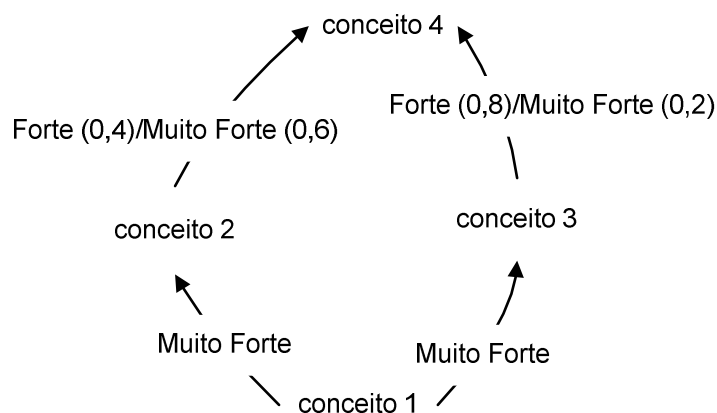


Figura 5.21 – Mapa *fuzzy* com julgamento incerto.

Na Figura 5.21, aparecem entre parêntesis, os graus de pertinência associados a cada termo linguístico atribuído a cada relação de influência. No caso das ligações 1-2 e 1-3, o julgamento foi efetuado com 100 % de certeza, sendo unitário o grau de pertinência associado a cada termo.

O julgamento realizado como ilustrado nesse exemplo, permite que, como no caso das ligações 2-4 e 3-4, sejam estabelecidas diferenças entre as intensidades das relações de influência, mesmo que os termos linguísticos utilizados sejam os mesmos. No caso em análise, observa-se que o efeito do conceito 1 sobre o conceito 4 é “Muito Forte” com um grau de pertinência maior, quando se considera a linha de argumentação 1-2-4.

No Apêndice 1, apresenta-se um exemplo de aplicação do módulo 3, ilustrando o processo de inferência causal e o tratamento das incertezas inerentes aos julgamentos dos decisores.

5.9 Análise do Impacto Ambiental Inserida na Avaliação Estratégica

A avaliação clássica das estratégias de ação, apresentada na Subseção 5.6.3, contempla os aspectos técnicos e econômicos, tradicionalmente considerados no setor elétrico. No entanto, reforçando o exposto na Seção 5.4, inclui-se no módulo 3, a avaliação do impacto ambiental das estratégias de ação em análise, avaliado de forma qualitativa, considerando os seguintes aspectos:

- manuseio, transporte e armazenamento dos resíduos: cada um desses aspectos deve ser classificado como “Pouco Seguro”, “Seguro” ou “Muito Seguro”, segundo avaliação dos indivíduos responsáveis pela tomada de decisão ou de especialistas na área, considerando entre outras coisas, os riscos de acidentes com a equipe técnica de manutenção, a possibilidade de contaminação de rios, lagos e plantações e os riscos aos animais;
- frequência da manutenção preventiva: a atividade de manutenção deve ser classificada como “Pouco Frequente”, “Frequente” ou “Muito Frequente”, segundo a avaliação dos indivíduos responsáveis pela tomada de decisão ou de especialistas, devendo-se levar em conta os intervalos entre essas atividades;
- utilização de novas tecnologias menos agressivas ao meio ambiente: as estratégias de ação devem ser avaliadas considerando-se a possibilidade de substituição do equipamento existente por um novo, que utilize novas tecnologias menos agressivas ao meio ambiente (novos materiais isolantes, pintura do tanque, etc) e o horizonte definido para essa substituição, rotulado como “Muito Curto”, “Curto”, “Médio”, “Longo” ou “Muito Longo”.

A avaliação ambiental de cada estratégia de ação é feita diretamente por meio de regras implementadas no módulo 3, conforme exemplo da Figura 5.22.

<p>Se</p> <p>Manuseio de resíduos é Seguro e</p> <p>Manutenção é Frequente ou Muito Frequente</p> <p>Então</p> <p>O efeito da estratégia sobre a redução do risco com o manuseio de resíduos é Moderado</p>
--

Figura 5.22 – Modelo de regra para a avaliação ambiental.

A avaliação dos riscos com o manuseio, o transporte e o armazenamento de resíduos é feita diretamente de forma qualitativa e desse modo, foram definidas funções de pertinência como as mostradas na Figura 5.23. Nesse caso, o usuário precisa definir previamente, com que grau de pertinência, o manuseio, o transporte e o armazenamento de resíduos está relacionado com cada um dos termos linguísticos utilizados para a rotulação dessas variáveis.

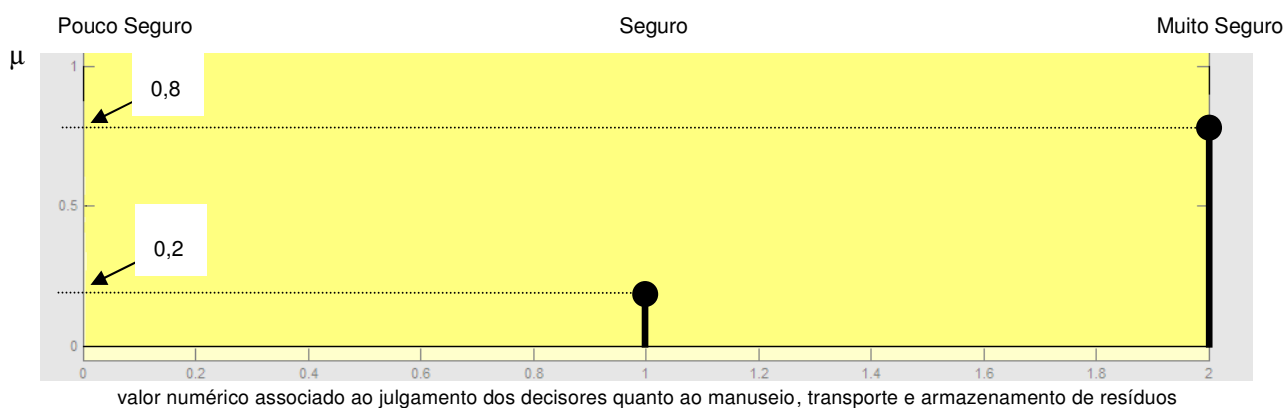


Figura 5.23 – Funções de pertinência para as variáveis “manuseio de resíduos”, “transporte de resíduos” e “armazenamento de resíduos”.

Considerando-se, por exemplo, os riscos com o manuseio de resíduos, observa-se na Figura 5.23, que tal atividade foi rotulada, levando-se em conta uma avaliação incerta, como sendo “Seguro”, com grau de pertinência igual a 0,2 e “Muito Seguro”, com grau de pertinência igual a 0,8.

Para a variável que representa a frequência da manutenção preventiva, foram definidas as funções de pertinência apresentadas na Figura 5.24. A manutenção executada com periodicidade compreendida entre 4 e 6 anos é considerada “Frequente”, com grau de pertinência unitário e quando o intervalo for superior a 6 anos e inferior a 8 anos, verifica-se a incerteza entre os conjuntos “Frequente” e “Muito Frequente”.

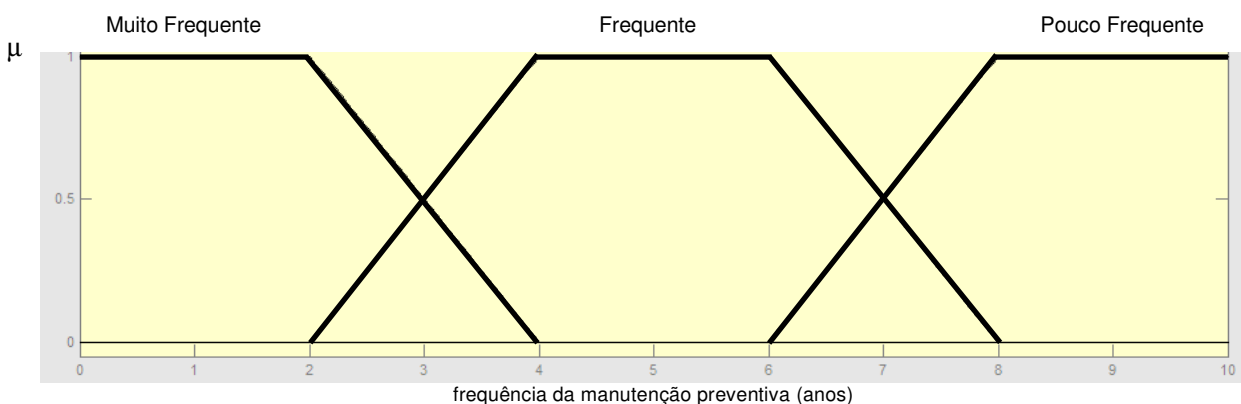


Figura 5.24 – Funções de pertinência para a variável “frequência da manutenção preventiva”.

O horizonte definido para a substituição do equipamento existente por um novo é representado pelas funções de pertinência apresentadas na Figura 5.25.

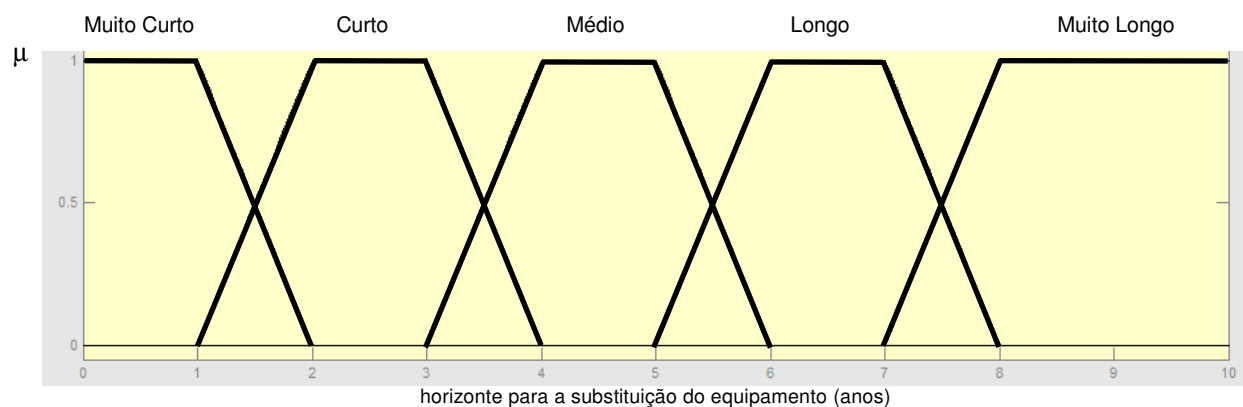


Figura 5.25 – Funções de pertinência para a variável “horizonte para a substituição do equipamento”.

De acordo com a Figura 5.25, um horizonte de 1 ano para a substituição do equipamento é considerado “Muito Curto”, com grau de pertinência igual a 1. Se o horizonte for superior a 3 anos e inferior a 4 anos, considera-se uma situação de incerteza entre os termos “Curto” e “Médio”.

5.10 Abordagem Monocritério para a Comparação das Estratégias de Ação

Para servir ao apoio à decisão, conforme premissa básica apresentada na Seção 5.2, a metodologia proposta deve permitir a comparação das estratégias de ação avaliadas. Tal comparação deve orientar uma das seguintes ações:

- 1º) ordenação das estratégias de ação;
- 2º) escolha da melhor estratégia;
- 3º) exclusão da(s) estratégia(s) com desempenho insatisfatório, segundo a avaliação dos decisores.

Na abordagem monocritério, adota-se o Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido (VPFCL), definido na Subseção 5.6.3, para o qual o desempenho técnico de uma estratégia de ação é traduzido economicamente na forma de receita com a venda de energia elétrica e de custos de manutenção e de falha, que quando combinados com os custos de investimento, com as penalidades por indisponibilidade e com os impostos devidos, permitem a determinação do lucro associado à operação do equipamento em análise.

Com base na avaliação monocritério, uma estratégia de ação E_i será preferível a uma estratégia E_j , se:

$$VPFCL_i > VPFCL_j$$

Em que:

$VPFCL_i$ – Valor presente do fluxo de caixa líquido da estratégia E_i .

$VPFCL_j$ – Valor presente do fluxo de caixa líquido da estratégia E_j .

5.11 Abordagem Multicritério para a Comparação das Estratégias de Ação

A abordagem multicritério utiliza a avaliação estratégica, apresentada na Seção 5.8 e visa a comparação das estratégias de ação sob o ponto de vista do cumprimento da missão da empresa, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais de avaliação.

O caráter multicritério dessa abordagem está associado com a estrutura apresentada pelo mapa causal, construído conforme descrito na Subseção 5.8.2 e que deve apresentar conceitos-atributo relacionados aos desempenhos técnico, econômico e ambiental das estratégias de ação e que atinjam a missão da empresa.

5.11.1 A Formulação de um Problema de Otimização Multiobjetivo

Segundo Lin, Yang e Whidborne (2003), um problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado como segue:

$$\begin{array}{ll} \text{otimizar} & F(x) = \{f_1(x), \dots, f_l(x), \dots, f_k(x)\} \\ \text{sujeita a} & x \in \Omega \end{array} \quad (5.9)$$

Em que:

$F(x)$ – conjunto de funções-objetivo.

x - vetor de variáveis de decisão do problema.

Ω - conjunto de restrições do problema.

Na metodologia proposta, não se pretende definir as funções-objetivo com base apenas nos aspectos de avaliação representados pelos conceitos-atributo do mapa causal. Entende-se que tal procedimento não permitiria uma avaliação estratégica das soluções alternativas, por não considerar o cumprimento da missão da empresa e as soluções de compromisso estariam associadas ao alcance de objetivos táticos, ou seja, em níveis hierárquicos inferiores.

Desse modo, estende-se a formulação apresentada em (5.9) para considerar que cada função-objetivo $f_i(x)$ representa o efeito sobre o cumprimento da missão da empresa, passando pelo i -ésimo conceito-atributo do mapa causal, considerando a avaliação qualitativa apresentada na Seção 5.8 e o problema multiobjetivo se torna um problema de maximização.

5.11.2 O Conceito de Otimalidade ou Dominância de Pareto

Adota-se como base para a comparação multicritério das estratégias de ação, o conceito de otimalidade de Pareto⁹ ou de dominância de Pareto. Esse conceito, segundo Miettinen (1999), pode ser aplicado a problemas caracterizados pela existência de diversas funções-objetivo e nas situações em que tais objetivos são conflitantes, como no caso do Gerenciamento de Ativos, não existe uma solução que otimize simultaneamente todas as funções. Lin, Yang e Whidborne (2003), afirmam que a otimização multiobjetivo não busca a solução ótima e sim, soluções eficientes ou soluções de compromisso, associadas a uma certa situação de priorização de objetivos.

Miettinen (1999) define um vetor de decisão x^* , pertencente a um conjunto Ω de soluções possíveis para um problema de otimização multiobjetivo, como uma solução “ótima de Pareto”, se não existir outra solução x , pertencente a Ω , tal que $f_i(x) \leq f_i(x^*)$, para todo $i = 1, \dots, k$ e $f_j(x) < f_j(x^*)$ para pelo menos uma função-objetivo j , considerando-se um problema de minimização.

Lin, Yang e Whidborne (2003) utilizam também os termos solução “eficiente”, “não inferior” ou “não dominada” e definem, adicionalmente, um vetor de decisão x^* , como uma solução “fracamente ótima de Pareto”, “fracamente eficiente”, “fracamente não inferior”, ou “fracamente não dominada”, se não existir outra solução x , tal que $f_i(x) < f_i(x^*)$, para todo $i =$

⁹ Vilfredo Pareto (1848-1923) – sociólogo, economista e filósofo italiano que introduziu, na Economia, o conceito de “Ótimo de Pareto”.

1, ..., k , sendo essa última condição satisfeita mais facilmente.

Para exemplificar as relações de dominância, por meio de um problema de minimização, considerem-se três soluções possíveis, x_1 , x_2 e x_3 , com desempenhos em dois aspectos de avaliação, determinados numericamente, conforme a Tabela 5.3.

Solução	Desempenho no Aspecto 1	Desempenho no Aspecto 2
x_1	10	5
x_2	13	6
x_3	7	11

Tabela 5.3 – Desempenhos de soluções para um problema com dois aspectos de avaliação.

Com base no conceito de dominância, verifica-se que:

x_2 é dominada por x_1 .

x_1 e x_3 são não dominadas.

Em um problema de otimização multiobjetivo, o conjunto de soluções não dominadas é chamado de “conjunto eficiente” ou “conjunto pareto-ótimo”. É entre as soluções não dominadas que se deve buscar a solução de compromisso, em função dos pesos atribuídos aos aspectos de avaliação. No exemplo, a solução x_1 seria a de compromisso, caso fosse atribuído um maior peso ao aspecto de avaliação 2 do que ao aspecto de avaliação 1 e em uma situação inversa, a solução de compromisso seria a solução x_3 .

5.11.3 Abordagem Multicritério na Metodologia Proposta

Com base no conceito de otimalidade de Pareto apresentado na subseção anterior, propõe-se direcionar a abordagem multicritério para a maximização do efeito sobre o cumprimento da missão da empresa, ou seja, buscar um efeito “Muito Forte”, considerando

cada um dos aspectos de avaliação (conceitos-atributo) do mapa causal. Desse modo, a abordagem multicritério para a comparação de alternativas de ação, segundo a metodologia proposta, deve seguir as seguintes etapas:

- 1º) analisar as relações de dominância entre as estratégias de ação, considerando os desempenhos numéricos em cada aspecto de avaliação, representado por cada conceito-atributo do mapa causal;
- 2º) eliminar as estratégias de ação dominadas, sob o ponto de vista quantitativo;
- 3º) separar os conceitos-atributo do mapa causal *fuzzy* por área de avaliação (técnica, econômica e ambiental) e avaliar, por meio do processo de inferência causal, os efeitos parciais e total de cada estratégia de ação sobre a missão da empresa, obtendo-se os melhores desempenhos dessas estratégias em cada uma dessas áreas;
- 4º) analisar as relações de dominância entre as estratégias de ação, considerando os melhores desempenhos qualitativos em cada área de avaliação;
- 5º) caso se observe a não existência de uma estratégia dominante, sob o ponto de vista qualitativo, gerar novas estratégias de ação, buscando a condição de dominância e a maximização do efeito sobre a missão da empresa, em todas as áreas de avaliação consideradas.

5.12 Conclusões

Nesse capítulo foi apresentada a metodologia proposta para o gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força. Buscou-se inicialmente listar as premissas básicas dessa metodologia, destacando-se em seguida, a visão global que é dada ao Gerenciamento de Ativos e a integração de diversas ferramentas e métodos para a execução das etapas de avaliação das condições do equipamento, do nível de risco da falha terminal e da proposição de estratégias de ação, bem como da avaliação de tais estratégias.

Além disso, foi dado destaque à consideração do impacto ambiental associado às

atividades de manutenção, considerado de forma conjunta com os aspectos tradicionais de caráter técnico e econômico. Assim, a metodologia proposta oferece aos indivíduos responsáveis pela tomada de decisão, formas diversificadas de avaliação das estratégias de ação concorrentes, aumentando a quantidade de informação disponível e permitindo inclusive a participação efetiva desses indivíduos, que passam a ter a oportunidade de expor suas preferências quanto aos resultados esperados e quanto à questão estratégica de cumprimento da missão da empresa.

Quanto à frequência de aplicação da metodologia nos estudos de definição e análise de estratégias alternativas para o gerenciamento do ciclo de vida de um transformador de força, entende-se ser conveniente acompanhar a periodicidade com a qual se efetua a análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, já que tal procedimento, inclusive de acordo com o que é proposto nesse trabalho, fornece informações que permitem a avaliação das condições do equipamento. Adicionalmente, reforça-se a idéia de que o Gerenciamento de Ativos é um problema multicritério e em geral multiobjetivo, indicando a necessidade da busca de uma solução de compromisso, melhor que uma solução ótima, obtida matematicamente pela minimização ou maximização de um único critério.

No capítulo seguinte, serão apresentados os resultados da aplicação dessa metodologia no estudo de casos, para os quais foram utilizados dados reais extraídos de uma empresa de transmissão de energia elétrica.

6

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

6.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta ao problema do gerenciamento do ciclo de vida de dois transformadores de força pertencentes a uma empresa de transmissão de energia elétrica. Os transformadores apresentam as mesmas características nominais e operam em uma mesma subestação, possuindo, no entanto, tempos de operação diferentes.

Pretende-se mostrar com a aplicação da metodologia proposta, a possibilidade de ordenação das estratégias de ação definidas a partir das linhas de ação fornecidas pelo modelo de aplicação, bem como a possibilidade de geração de novas estratégias, a partir das estratégias inicialmente consideradas, além do tratamento das incertezas relativas aos julgamentos das preferências dos indivíduos envolvidos no processo de tomada de decisão.

6.2 Considerações Iniciais

Os dois transformadores operam em uma subestação de 525 kV e em caso de substituição definitiva de um desses transformadores, um equipamento novo terá que ser adquirido.

Considera-se que a tomada de decisão é de responsabilidade de dois engenheiros do Departamento de Engenharia/Divisão de Manutenção, chamados de agora em diante de decisores e que no papel de facilitador atuou o autor desse trabalho. A empresa adota tradicionalmente a seguinte estratégia de manutenção:

- inspeção a cada 3 meses;
- manutenção preventiva a cada 6 anos;
- substituição após a falha terminal.

6.3 Características dos Transformadores Analisados

- Construção: Banco Monofásico
- Potência Nominal = 672 MVA
- Relação de Tensões = 525/230/13,8 kV
- Potência Média Transmitida = 550 MW
- Tempos em Operação:
Transformador 1: 25 anos
Transformador 2: 1 ano

6.4 Dados para a Avaliação Econômica

- Pagamento base mensal com a venda de energia elétrica = R\$ 700.000,00
- Custo de um Transformador Novo = R\$ 6.000.000,00
- Custos de operação = R\$ 3.000,00/mês (fixo)
- Custos de Inspeção = R\$ 1.187,50 (fixo)
- Custos de Manutenção Preventiva Menor* = $20 \cdot t + 3.000$ (linear com o tempo)
- Custos de Manutenção Preventiva Maior* = $20 \cdot t + 170.000$ (linear com o tempo)
- Custo de Manutenção Corretiva* = $20 \cdot t + 250.000$ (linear com o tempo)
- Custos da Falha* = $30 \cdot t$ (linear com o tempo)

-
- Impostos sobre o faturamento: PIS = 1,65 % e COFINS = 7,6 %
 - Imposto de renda = 25 %
 - Contribuição social = 9 %
 - Taxa de desconto = 10 % a.a.

* $\text{custo} = a \cdot t + b$

Em que:

a – parcela variável de custo (R\$/min).

b – parcela fixa de custo (R\$).

t – tempo de permanência no estado de manutenção ou falha (minutos).

6.5 Estudo de Caso 1

a) Aplicação do módulo 1

O módulo 1 forneceu, por meio do método *First Passage Time*, as estimativas de tempo até a falha terminal, dos custos da falha terminal e do estágio atual de deterioração do equipamento. Na Figura 6.1 apresenta-se a curva de vida do equipamento e considerando um tempo de operação de 25 anos, estima-se um tempo de 11,2 anos até a falha terminal, com um custo associado de R\$ 2.360.365,19. Além disso, o equipamento encontra-se atualmente bem próximo do estágio de deterioração D_3 da cadeia de Markov.

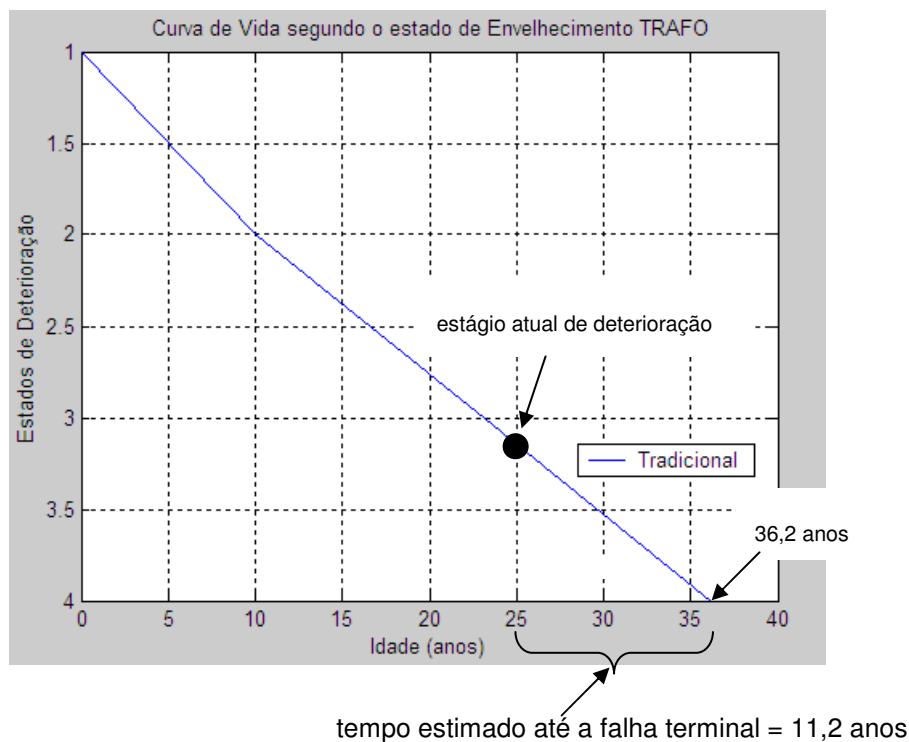


Figura 6.1 – Curva de vida do transformador 1 – Estratégia tradicional de manutenção.

b) Aplicação do módulo 2

O módulo 2 faz o diagnóstico de falhas incipientes e avalia o nível de risco da falha terminal do equipamento. Para esse transformador, a última amostra de gases dissolvidos no óleo mineral isolante apresentou os seguintes valores:

- Hidrogênio (H_2) – 250 ppm.
- Etano (C_2H_6) – 25 ppm.
- Metano (CH_4) – 50 ppm.
- Monóxido de Carbono (CO) – 450 ppm.
- Acetileno (C_2H_2) – 75 ppm.
- Dióxido de Carbono (CO_2) – 612 ppm.
- Etileno (C_2H_4) – 150 ppm.

Para essa amostra de gases e considerando os resultados fornecidos pelo módulo 1, os seguintes resultados foram fornecidos pelo módulo 2:

Diagnóstico Combinado <i>Fuzzy</i>	Nível de Risco da Falha Terminal
Falha Elétrica	Tolerável

Quadro 6.1 – Diagnóstico combinado e nível de risco da falha – Estudo de Caso 1.

O diagnóstico de falha elétrica foi fornecido pelo método NBR-7274, sendo que o método de Doernenburg não forneceu diagnóstico devido à combinação das relações de gases utilizadas pelo mesmo. Assim, verifica-se a importância da utilização de uma metodologia que considere a combinação dos resultados fornecidos por mais de um método de diagnóstico.

Observa-se que, embora o nível de risco da falha terminal tenha sido avaliado como “Tolerável”, o diagnóstico de falha elétrica requer a adoção de ações que permitam a eliminação dessa situação operativa.

c) Linhas de Ação Fornecidas pelo Modelo de Aplicação e Estratégias de Ação Definidas pelos Decisores

No Quadro 6.2 são listadas as linhas de ação fornecidas pelo módulo 2, bem como as estratégias de ação definidas pelos decisores.

Linhas de Ação Plausíveis	Estratégias de Ação
<ul style="list-style-type: none"> - Manter o equipamento em operação e continuar com a estratégia tradicional de manutenção. - Manter o equipamento em operação e diminuir o intervalo entre manutenções preventivas. - Retirar imediatamente o equipamento para manutenção e continuar com a estratégia tradicional. - Retirar imediatamente o equipamento para manutenção e reduzir a periodicidade da manutenção. - Retirar o equipamento para manutenção após um tempo definido e continuar com a estratégia tradicional. - Retirar o equipamento para manutenção após um tempo definido e reduzir a periodicidade da manutenção. - Substituir imediatamente ou antecipar a substituição do equipamento. 	<p>Estratégia Alternativa 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Substituição imediata do transformador¹⁰. • Adoção da estratégia tradicional de manutenção. <p>Estratégia Alternativa 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspeção a cada 3 meses. • Manutenção preventiva a cada 3 anos. • Substituição do transformador em 5 anos com retorno à estratégia tradicional de manutenção. <p>Estratégia Alternativa 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspeção a cada 3 meses. • Manutenção preventiva a cada 3 anos. • Substituição do transformador em 10 anos com retorno à estratégia tradicional de manutenção.

Quadro 6.2 – Linhas de ação e estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

A estratégia tradicional foi descartada pelos decisores, devido à existência de diagnóstico de falha elétrica. As três estratégias alternativas apontam para tentativas de eliminação da falha incipiente e para a postergação da falha terminal, sendo as estratégias alternativas 2 e 3, caracterizadas pela tentativa de postergar o investimento em um transformador novo, reduzindo inicialmente a periodicidade da manutenção preventiva.

¹⁰ Mesmo considerando-se a existência de um equipamento reserva, a substituição do equipamento existente requer a compra de um equipamento novo.

d) Avaliação das Estratégias de Ação

d.1) Avaliação Clássica

Para a avaliação clássica, utilizou-se novamente o módulo 1, com os seguintes parâmetros para a simulação da operação do equipamento via método *Monte Carlo*:

- Número inicial de amostras = 10.
- Número de simulações por amostra = 50.
- Parâmetro para o teste de convergência (β) = 0,005.

Com esses parâmetros e considerando um horizonte de simulação de 20 anos, observou-se a convergência do processo de simulação de cada estratégia alternativa após as 500 simulações iniciais.

d.1.1) Avaliação Técnica

Os resultados da avaliação técnica são apresentados na Tabela 6.1, devendo-se observar que, os valores de indisponibilidade e de energia esperada não suprida estão separados. Na soma para a obtenção dos valores totais de indisponibilidade e de energia não suprida, o primeiro valor refere-se às saídas por manutenção e o segundo, às saídas por falha.

	Estratégia Alternativa 1	Estratégia Alternativa 2	Estratégia Alternativa 3
Indisponibilidade (h/ano)	24,86 + 38,89 = 63,75	26,16 + 47,29 = 73,45	27,88 + 48,70 = 76,59
Energia Esperada Não Suprida (MWh/ano)	13.673,92 + 21.388,06 = 35.061,98	14.389,48 + 26.008,56 = 40.398,04	15.336,19 + 26.786,41 = 42.122,60

Tabela 6.1 – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Na Figura 6.2 ilustra-se graficamente, a comparação entre as três estratégias alternativas, quanto ao desempenho técnico.

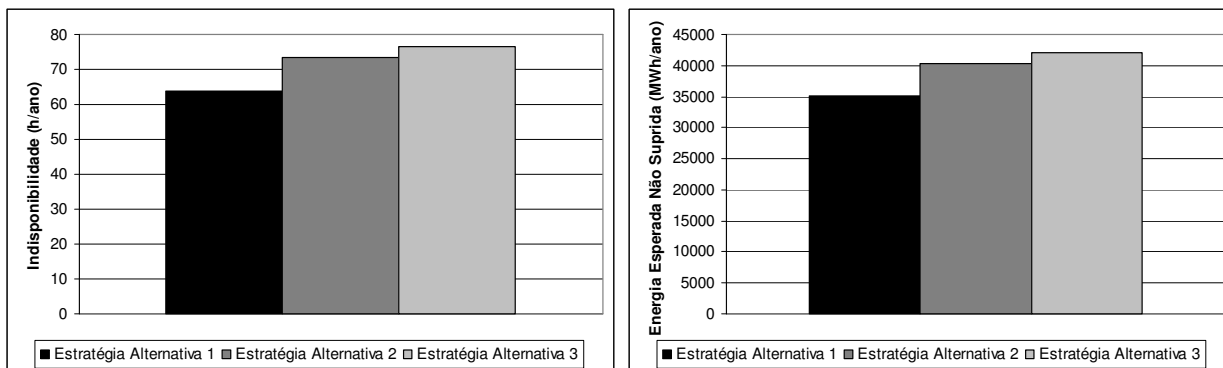


Figura 6.2 – Desempenho técnico das estratégias alternativas- Estudo de Caso 1.

Observa-se que as opções de postergar a substituição do transformador existente, representadas pelas alternativas 2 e 3, resultam em piores desempenhos sob o ponto de vista técnico, ou seja, a substituição imediata aparece como melhor opção para o aumento da confiabilidade, apresentando menor indisponibilidade e energia não suprida, tanto devido à manutenção, como devido à falha. Além disso, estima-se que tal estratégia postergue a falha terminal para daqui a 36,2 anos (ver Figura 6.1), reduzindo para “Muito Baixo”, o nível de risco da falha terminal.

d.1.2) Avaliação Econômica

Para a avaliação econômica, foram obtidos os resultados da Tabela 6.2.

	Estratégia Alternativa 1	Estratégia Alternativa 2	Estratégia Alternativa 3
Custos de Administração e Operação (R\$)	323.230,89	323.183,56	323.178,82
Custos de Inspeção e Manutenção (R\$)	440.400,26	481.500,70	528.681,33
Custos da Falha (R\$)	534.927,30	845.886,31	884.939,66
Custos de Investimento (R\$)	6.648.206,04	4.707.445,77	3.997.730,69
Parcela Variável por Indisponibilidade (R\$)	5.417.992,96	7.576.515,72	8.077.583,04
Receita Operacional (R\$)	69.913.216,77	67.754.694,01	67.253.626,69
Lucro Mensal da Gestão do Negócio (R\$)	68.614.658,32	66.104.123,45	65.516.826,88
Lucro Operacional (R\$)	65.973.941,65	64.114.241,89	63.758.166,18
Lucro Líquido (R\$)	43.542.801,49	42.315.399,65	42.080.389,68
Fluxo de Caixa Operacional Líquido (R\$)	46.183.518,16	44.305.281,20	43.839.050,38
Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	39.535.312,12	39.597.835,43	39.841.319,69

Tabela 6.2 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Na Figura 6.3, apresentam-se alguns dos índices de desempenho econômico para as estratégias concorrentes.

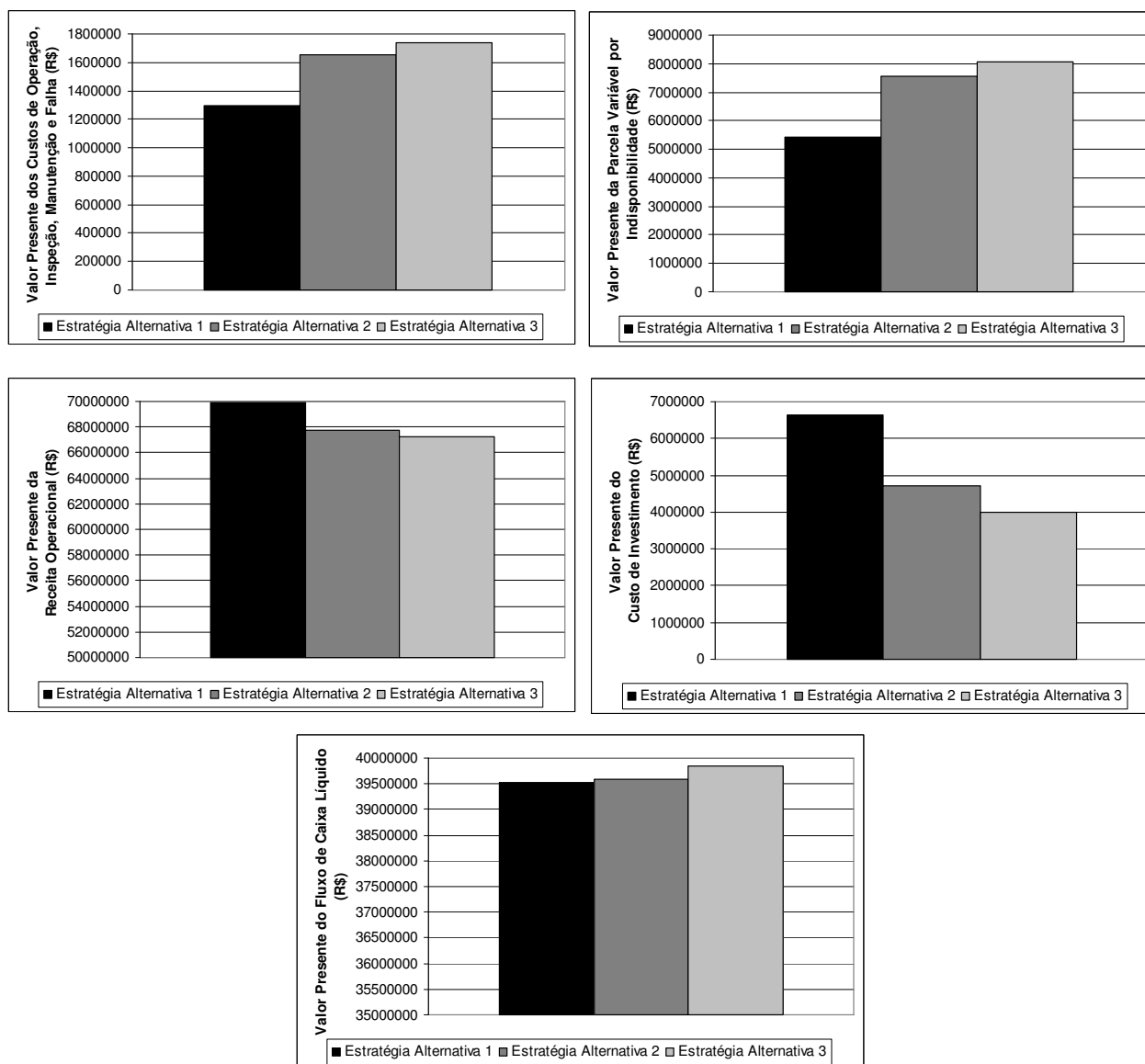


Figura 6.3 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Embora apresente maiores custos de inspeção, manutenção e falha, uma maior parcela variável por indisponibilidade e uma menor receita operacional, com menor lucro, a estratégia

alternativa 3, por apresentar menor custo de investimento, devido à postergação da substituição do equipamento para um período mais próximo do horizonte de análise, apresenta um maior valor presente do fluxo de caixa líquido, mesmo não sendo muito significativas as diferenças com relação às demais alternativas, como se observa nessa figura.

Para o caso do transformador 1, o método do VPFCL resultou em uma situação de indiferença quanto à estratégia de ação a ser adotada, o que dificulta a tomada de decisão. Em um estudo adicional, utilizando-se uma taxa de desconto de 13 % a.a., verificou-se um resultado semelhante, ou seja, a ordenação das estratégias de ação não foi alterada e as diferenças numéricas quanto ao VPFCL continuaram pouco significativas.

d.2) Avaliação Estratégica

De acordo com a Seção 5.9, apresentam-se inicialmente, os resultados fornecidos pelo módulo 3, quanto ao impacto ambiental de cada estratégia alternativa.

d.2.1) Avaliação do Impacto Ambiental das Estratégias Alternativas

Para a avaliação do impacto ambiental, considerou-se que o resíduo gerado pela manutenção é tóxico (óleo mineral isolante) e que a empresa adota técnicas seguras de manuseio, transporte e armazenamento do mesmo e por isso o desempenho das estratégias alternativas vai depender da periodicidade das atividades de manutenção. Considerou-se que a substituição do transformador existente possibilitará a utilização, no caso do transformador novo, de novas tecnologias menos agressivas ao meio ambiente e nesse caso, o melhor desempenho deve ser apresentado pela estratégia caracterizada por uma substituição mais próxima do momento atual.

Na Tabela 6.3, apresentam-se os desempenhos de cada estratégia nos aspectos de avaliação qualitativa do impacto ambiental. Para a estratégia 1, a frequência de manutenção é de 6 anos e para as estratégias 2 e 3, é de 3 anos, até que o equipamento seja substituído.

Estratégia Alternativa	Redução dos Riscos com o Manuseio, Transporte e Armazenamento de Resíduos		Utilização de Novas Tecnologias Menos Agressivas ao Meio Ambiente	
	Desempenho	Grau de Pertinência	Desempenho	Grau de Pertinência
1	Forte	1,0	Muito Forte	1,0
2	Moderado	0,5	Moderado	1,0
3	Moderado	0,5	Muito Fraco	1,0

Tabela 6.3 – Desempenhos quanto ao impacto ambiental – Estudo de Caso 1.

d.2.2) Inferência Causal para a Avaliação Estratégica

A inferência causal foi baseada no mapa fuzzy da Figura 6.4.

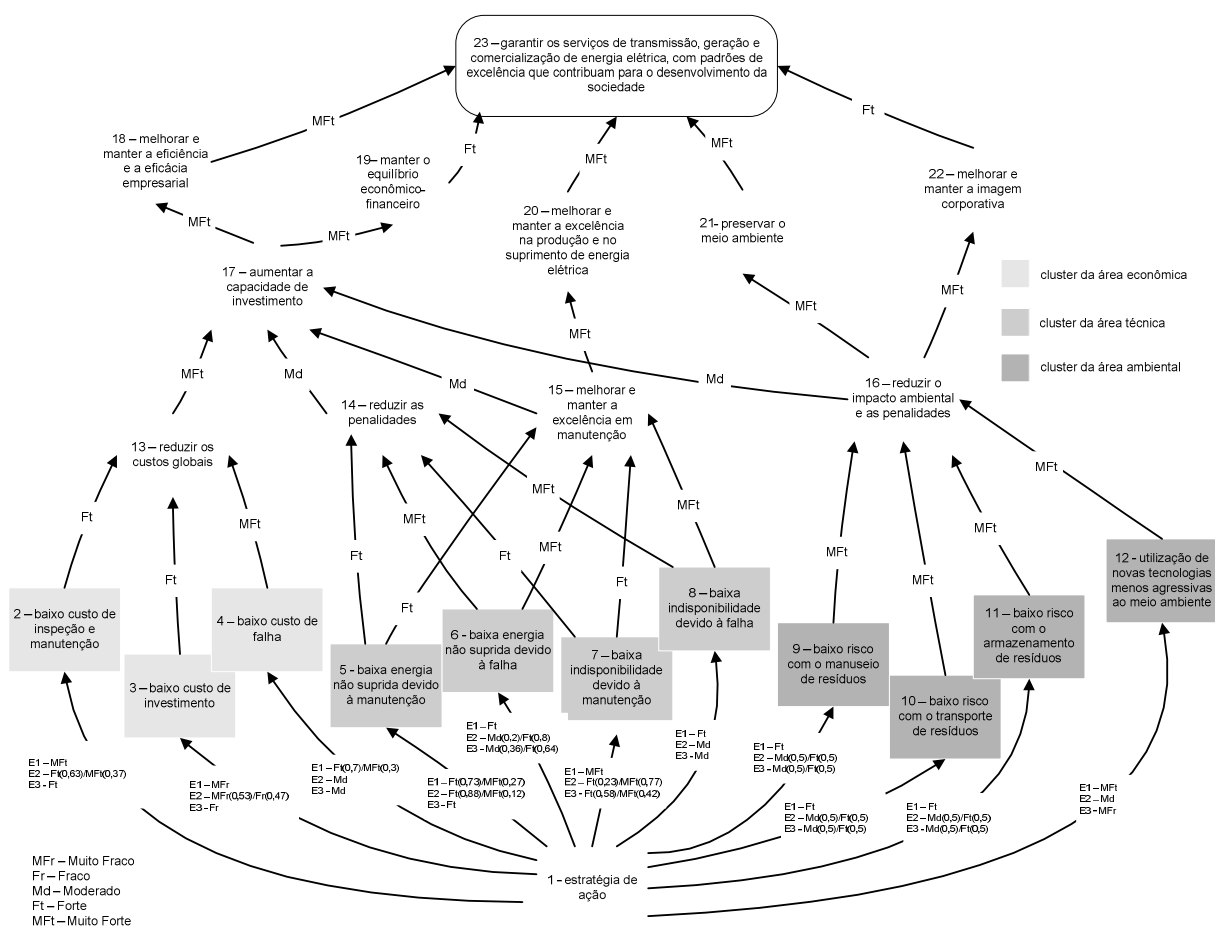


Figura 6.4 – Mapa fuzzy para o cenário de preferências dos decisores – Estudo de Caso 1.

Esse mapa é composto por 42 linhas de argumentação, que iniciam no conceito-ação (conceito 1), passam por cada conceito-atributo (conceitos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12), chegando até o conceito-missão. Os índices de avaliação técnica, “indisponibilidade” e “energia esperada não suprida” estão sendo representados por dois conceitos cada um, considerando separadamente a indisponibilidade associada à manutenção preventiva, e a indisponibilidade associada à manutenção corretiva e à falha (conceitos 5, 6, 7 e 8).

O mapa *fuzzy* mostrado na Figura 6.4 foi construído por meio da interação entre o facilitador e os decisores, buscando-se inicialmente a definição dos conceitos componentes desse mapa, bem como a relação de causa-efeito entre os mesmos. Em seguida esse processo iterativo teve como objetivo, com base no julgamento de preferências dos decisores, a definição das intensidades das relações de causa-efeito identificadas.

Com o julgamento efetuado pelos decisores, observa-se a importância dada à redução da indisponibilidade e da energia não suprida devido à falha e dos custos associados, bem como à redução do impacto ambiental, sendo que todas as ligações que partem dos conceitos que representam tais aspectos apresentam intensidade “Muito Forte”. Adicionalmente, destacam-se os *clusters* (conjuntos de conceitos) associados às áreas técnica, econômica e ambiental, que caracterizam o tratamento multicritério da avaliação estratégica.

Algumas ligações entre o conceito-ação e os conceitos-atributo, dependentes dos desempenhos das estratégias de ação nos aspectos representados por esses conceitos-atributo, são caracterizadas pela incerteza, ou seja, apresentam graus de pertinência inferiores ao unitário em dois conjuntos *fuzzy*, sendo esses valores numéricos apresentados entre parêntesis no mapa. Por exemplo, a ligação 1-2 representa o efeito de uma estratégia alternativa sobre a redução dos custos de inspeção e manutenção e a estratégia 2 apresenta efeito “Forte” e “Muito Forte”, com graus de pertinência iguais a 0,63 e 0,37, respectivamente, conforme se observa na Figura 6.4.

Seguindo a abordagem multicritério apresentada na Seção 5.11.3, verificou-se

inicialmente, com base nos valores apresentados nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, a não existência de estratégias de ação dominadas, sob o ponto de vista numérico e ambiental. Em seguida, o mapa *fuzzy* foi utilizado para a avaliação qualitativa do efeito de cada estratégia sobre a missão da empresa e, como forma de gerar informações adicionais para essa avaliação, até mesmo para a geração de novas estratégias, destacam-se as “linhas de argumentação principais”, formadas apenas por ligações com intensidade “Muito Forte”, a partir dos conceitos-atributo.

As linhas de argumentação principais mostram em que aspecto(s) de avaliação uma determinada estratégia de ação pode apresentar efeito máximo, ou seja, “Muito Forte” sobre a missão da empresa ou pode ter seu desempenho melhorado, o que equivale à geração de novas estratégias, para maximizar esse efeito, seguindo as preferências dos decisores.

O Quadro 6.3 apresenta as linhas de argumentação principais, para o cenário considerado.

Linhas de Argumentação Principais
1- 4 – 13 – 17 – 18 – 23
1-6 – 15 – 20 – 23
1-8 – 15 – 20 – 23
1-9 – 15 – 20 – 23
1-10 – 16 – 21 – 23
1-11 – 16 – 21 – 23
1-12 – 16 – 21 – 23

Quadro 6.3 – Linhas de argumentação principais.

Nos quadros 6.4, 6.5 e 6.6, apresentam-se os melhores desempenhos de cada estratégia alternativa, considerando cada um dos *clusters* que representam as três áreas de avaliação estratégica. Esses resultados serviram para a comparação das estratégias alternativas, segundo a abordagem multicritério.

Estratégia Alternativa 1			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1- 6 – 15 – 20 – 23 1- 7 – 15 – 20 – 23 1- 8 – 15 – 20 – 23	4,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte Muito Forte	0,7 0,3	1- 4 – 13 – 17 – 18 – 23	4,34
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1- 12 – 16 – 21 – 23	5,0

Quadro 6.4 – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 1.

Estratégia Alternativa 2			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	0,88	1- 5 – 15 – 20 – 23	4,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	0,63	1- 2 – 13 – 17 – 18 – 23 1- 2 – 13 – 17 – 19 – 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Moderado Forte	0,5 0,5	1 - 9 – 16 – 21 – 23 1 - 9 – 16 – 22 – 23 1- 10 – 16 – 21 – 23 1- 10 – 16 – 22 – 23 1 - 11 – 16 – 21 – 23 1 - 11 – 16 – 22 – 23	3,5

Quadro 6.5 – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 2.

Estratégia Alternativa 3			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 5 - 15 - 20 - 23	4,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 2 - 13 - 17 - 18 - 23 1 - 2 - 13 - 17 - 19 - 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Moderado Forte	0,5 0,5	1 - 9 - 16 - 21 - 23 1 - 9 - 16 - 22 - 23 1 - 10 - 16 - 21 - 23 1 - 10 - 16 - 22 - 23 1 - 11 - 16 - 21 - 23 1 - 11 - 16 - 22 - 23	3,5

Quadro 6.6 – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 3.

Na Figura 6.5, comparam-se os melhores desempenhos das estratégias alternativas, em cada área de avaliação.

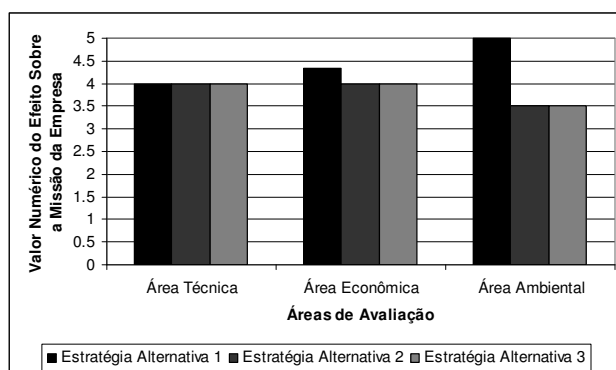
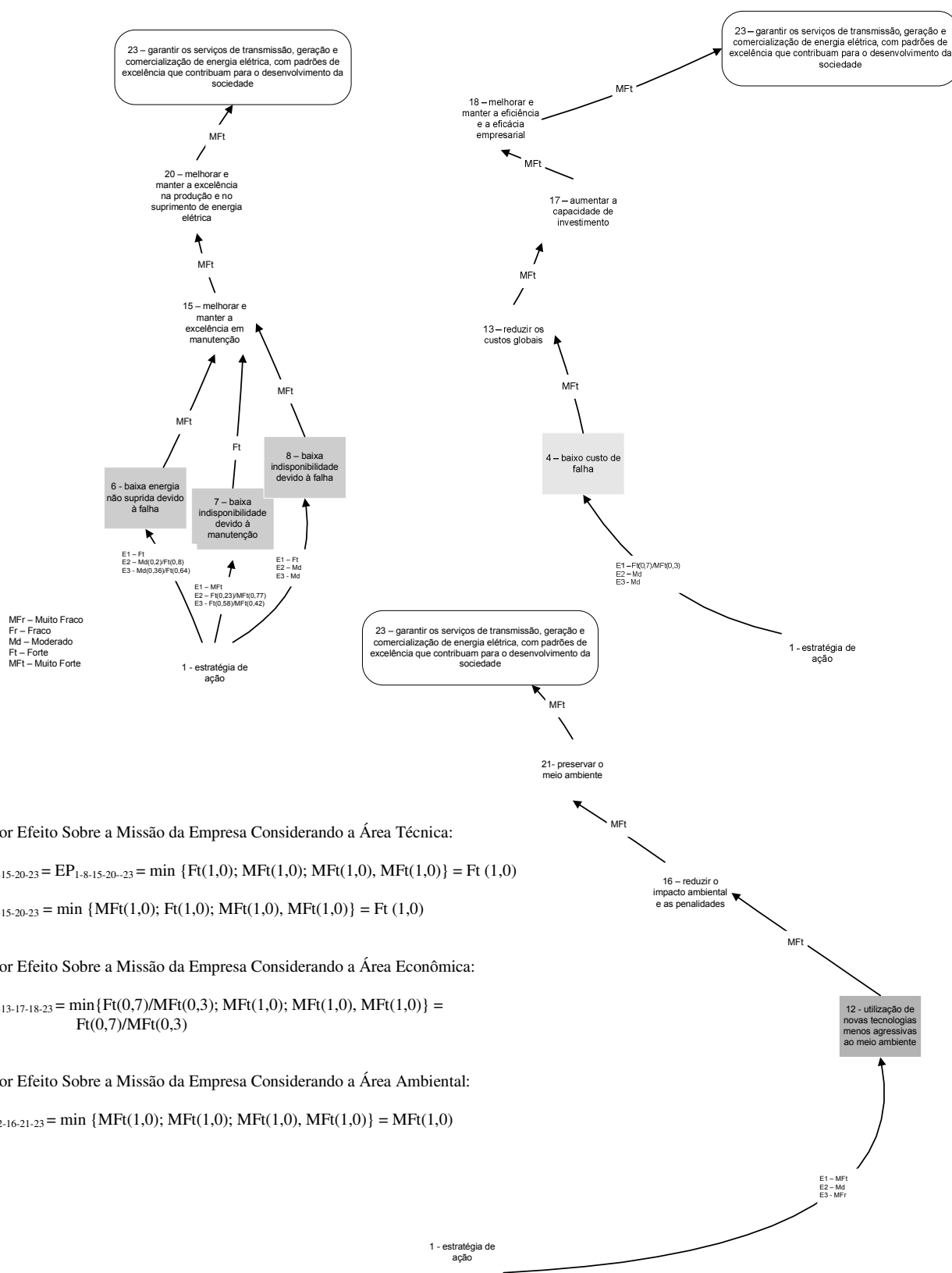


Figura 6.5 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas - Estudo de Caso 1.

Observa-se a dominância da estratégia 1, que considera a substituição imediata do equipamento, com relação às concorrentes, considerando-se, no entanto, por parte dessa estratégia, a maximização do efeito sobre a missão da empresa, apenas na área ambiental.

Como orientação para a busca da maximização do desempenho estratégico, também nas áreas técnica e econômica, deve-se observar que a estratégia alternativa 1 apresenta desempenho “Forte”, nas linhas de argumentação principais 1-6-15-20-23 e 1-8-15-20-23, relacionadas com a energia não suprida e com a indisponibilidade devido à falha do equipamento, além de apresentar desempenho “Forte” com grau de pertinência igual a 0,7 e “Muito Forte” com grau de pertinência igual a 0,3, na linha de argumentação principal 1-4-13-17-18-23, relacionada com os custos da falha.

Na Figura 6.6, apresentam-se as linhas de argumentação nas quais a estratégia alternativa 1 apresentou melhor desempenho, em cada área de avaliação.



e) A Geração de Novas Estratégias de Ação

O desempenho apresentado pela estratégia 1, na avaliação estratégica, serviu como orientação para a geração de novas estratégias alternativas, visando a maximização do efeito sobre a missão da empresa, nas áreas técnica e econômica. Desse modo, as seguintes estratégias foram geradas:

Estratégia Alternativa 4:

- substituição imediata do transformador;
- inspeção a cada 3 meses;
- manutenção preventiva a cada 4 anos.

Estratégia Alternativa 5:

- substituição imediata do transformador;
- inspeção a cada 3 meses;
- manutenção preventiva a cada 3 anos.

Com essas novas estratégias alternativas, propõe-se a redução da periodicidade da manutenção, mesmo considerando a substituição do equipamento, como forma de melhorar os desempenhos técnico e econômico, relacionados com a falha do equipamento. Nas Tabelas 6.4 e 6.5, apresentam-se os desempenhos dessas novas estratégias.

	Estratégia Alternativa 4	Estratégia Alternativa 5
Indisponibilidade (h/ano)	$34,07 + 32,76 = 66,83$	$47,93 + 16,92 = 64,85$
Energia Esperada Não Suprida (MWh/ano)	$18.736,50 + 18.018,11 = 36.754,61$	$26.359,65 + 9.306,76 = 35.666,41$

Tabela 6.4 – Desempenho técnico das novas estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Na comparação entre essas duas novas estratégias de ação, observa-se um melhor desempenho técnico quantitativo da estratégia 5, considerando-se o balanço entre a

indisponibilidade e a energia não suprida por manutenção e por falha.

	Estratégia Alternativa 4	Estratégia Alternativa 5
Custos de Administração e Operação (R\$)	323.223,50	323.191,93
Custos de Inspeção e Manutenção (R\$)	599.269,71	823.257,17
Custos da Falha (R\$)	445.676,28	235.616,78
Custos de Investimento (R\$)	6.547.528,43	6.389.531,72
Parcela Variável por Indisponibilidade (R\$)	5.609.603,60	5.306.251,97
Receita Operacional (R\$)	69.721.606,13	70.024.957,76
Lucro Mensal da Gestão do Negócio (R\$)	68.353.436,64	68.642.891,88
Lucro Operacional (R\$)	65.720.908,82	66.037.865,03
Lucro Líquido (R\$)	43.375.799,82	43.584.990,92
Fluxo de Caixa Operacional Líquido (R\$)	46.008.327,64	46.190.017,77
Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	39.460.799,21	39.800.486,05

Tabela 6.5 – Desempenho econômico das novas estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

O melhor desempenho técnico da estratégia 5 se refletiu sob o ponto de vista econômico. No entanto, a estratégia 3, inicialmente avaliada, continua com um VPFCL ligeiramente superior ao de todas as outras estratégias analisadas quantitativamente (ver Tabela 6.2) e a situação de indiferença permanece presente.

As duas novas estratégias alternativas foram avaliadas sob o ponto de vista estratégico, com os resultados apresentados nos Quadros 6.7 e 6.8. Observa-se, para o cenário de preferências definido pelos decisores, que a estratégia 5 maximiza os desempenhos estratégicos nas três áreas de avaliação, uma vez que tal estratégia vai ao encontro dos objetivos de melhoria de desempenho no que diz respeito ao aspecto técnico de redução da indisponibilidade e da energia não suprida devido à falha, ao aspecto econômico de redução do custo da falha e ao aspecto de redução do impacto ambiental.

Estratégia Alternativa 4			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 5 - 15 - 20 - 23 1 - 6 - 15 - 20 - 23 1 - 7 - 15 - 20 - 23 1 - 8 - 15 - 20 - 23	4,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 4 - 13 - 17 - 18 - 23	5,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 12 - 16 - 21 - 23	5,0

Quadro 6.7 – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 4.

Estratégia Alternativa 5			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 6 - 15 - 20 - 23 1 - 8 - 15 - 20 - 23	5,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	4 - 13 - 17 - 18 - 23	5,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	12 - 16 - 21 - 23	5,0

Quadro 6.8 – Melhores desempenhos da estratégia alternativa 5.

Na Figura 6.7 apresenta-se uma comparação final, sob o ponto de vista estratégico, das cinco estratégias alternativas geradas para esse primeiro estudo de caso, mostrando a

dominância da estratégia 5, considerada a de melhor desempenho estratégico, sobre as concorrentes. Assim, para esse estudo de caso, a substituição do equipamento, combinada com a redução da periodicidade da manutenção preventiva (mesmo considerando que um novo equipamento entrará em operação), é a alternativa que vai ao encontro das preferências dos decisores, no que diz respeito à melhoria de desempenho quanto à falha (indisponibilidade, energia não suprida e custo) e quanto à redução do impacto ambiental da manutenção.

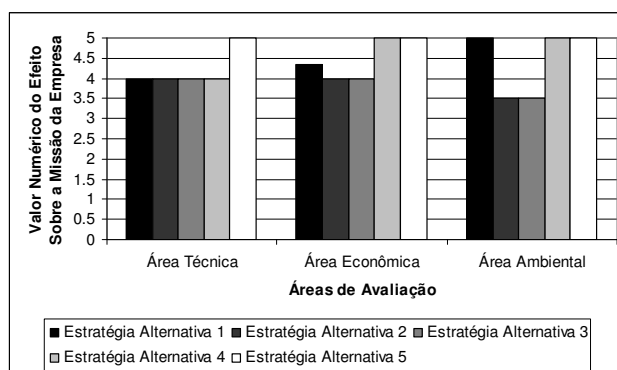


Figura 6.7 – Comparação final das estratégias alternativas – Estudo de Caso 1.

Em uma avaliação adicional, verificou-se que a adoção da estratégia de redução da periodicidade da manutenção, de 6 para 3 anos, sem considerar a substituição do equipamento, poderia ter sido adotada, em um momento anterior, antes que o mesmo atingisse os 25 anos de tempo em operação. Por exemplo, uma simulação realizada considerando-se um tempo de operação de 10 anos, com o equipamento no estado de deterioração D_2 da cadeia de Markov (ver curva de vida do equipamento, na Figura 6.2), mostrou reduções na indisponibilidade e na energia não suprida devido à falha, com consequente redução do custo da falha, o que vai ao encontro das preferências dos decisores, em priorizar a redução da interrupção forçada no suprimento de energia elétrica.

Com um tempo de 25 anos em operação, a opção de redução da periodicidade da manutenção, sem considerar a substituição do equipamento, parece tardia e os resultados da

avaliação estratégica apontam para a substituição imediata do mesmo, acompanhada pela redução na periodicidade da manutenção.

f) Análise *What-If* do Estudo de Caso 1

Os resultados fornecidos pelo modelo de aplicação permitem que se efetue uma análise do tipo *What-If*, visando à obtenção de respostas a alguns questionamentos feitos pelos indivíduos responsáveis pela tomada de decisão, principalmente nas situações em que as preferências desses indivíduos não estiverem bem definidas. Na metodologia proposta, tal procedimento pode ser efetuado com base nos resultados numéricos fornecidos pelo módulo 1, caracterizando uma análise quantitativa

No Quadro 6.9, apresenta-se, na forma de perguntas e respostas, de que forma tal análise pode ser efetuada, considerando-se alguns aspectos de caráter técnico e econômico.

Pergunta	Resposta
Se a periodicidade da manutenção é reduzida de 6 para 3 anos ?	- A indisponibilidade devido à manutenção aumenta 92 % - A indisponibilidade devido à falha diminui 42 % - Os custos de manutenção aumentam 87,6 % - Os custos de falha diminuem 41 %
Se o tempo de execução da manutenção preventiva for reduzido de 10 para 5 dias ?	- A energia não suprida devido à manutenção diminui 47,5 % - As penalidades por indisponibilidade diminuem 9,5 %
Se o equipamento existente é substituído, mantendo-se a mesma política de manutenção ?	- A indisponibilidade devido à manutenção diminui 5,4 % - A indisponibilidade devido à falha diminui 29,7 % - Os custos de investimento aumentam 4,9 % - Os custos de manutenção diminuem 12,5 % - Os custos de falha diminuem 40,3 % - As penalidades por indisponibilidade diminuem 33,7 %

Quadro 6.9 – Exemplo de análise do tipo *What-If* – Estudo de Caso 1.

Pode-se verificar que, a análise do tipo *What-If* corresponde a um procedimento alternativo ao efetuado nesse estudo de caso. Em outras palavras, ao invés de selecionar a melhor estratégia para o alcance de um resultado desejado, condizente com as preferências dos decisores, essa análise permite estabelecer previamente algumas estratégias e observar os

resultados fornecidos por cada uma dessas soluções.

g) Esforço Computacional para a Simulação das Estratégias de Ação

Deve-se mencionar, neste ponto, o esforço computacional para a realização das simulações da operação do equipamento pelo método *Monte Carlo*, aspecto que no passado, de certa forma, limitou a utilização desse método. Nesse estudo de caso, utilizando-se um computador de 1,6 GHz e 1 GB de memória RAM, 3 estratégias foram simuladas, em um tempo total de 1,621 minutos e considerando-se os 500 sorteios realizados para cada estratégia, tem-se um tempo de 0,0011 minutos por simulação.

Assim, observa-se que a evolução tecnológica, sob o ponto de vista de processamento computacional, tem contribuído para que se aumente a aplicabilidade do método de simulação *Monte Carlo*.

6.6 Estudo de Caso 2

a) Aplicação do módulo 1

O transformador 2 está em operação há 1 ano, sendo submetido à mesma estratégia de gerenciamento do ciclo de vida adotada para o transformador 1. Desse modo, pode-se considerar para esse transformador, a mesma curva de vida mostrada na Figura 6.1, o que permite considerar que o tempo até a falha terminal é de 35,2 anos, com custo de falha igual a R\$ 239.637,48 e que o mesmo se encontra atualmente no estágio inicial de deterioração (D_1).

b) Aplicação do módulo 2

Para o transformador 2, tem-se a amostra de gases apresentada a seguir:

- Hidrogênio (H_2) – 16 ppm.
- Etano (C_2H_6) – 2 ppm.
- Metano (CH_4) – 5 ppm.
- Monóxido de Carbono (CO) – 121 ppm.
- Acetileno (C_2H_2) – 5 ppm.
- Dióxido de Carbono (CO_2) – 749 ppm.
- Etileno (C_2H_4) – 2 ppm.

A aplicação do módulo 2 resultou no diagnóstico de falhas e na avaliação do nível de risco da falha terminal, apresentados no Quadro 6.10.

Diagnóstico Combinado <i>Fuzzy</i>	Nível de Risco da Falha Terminal
Sem Falha	Muito Baixo

Quadro 6.10 – Diagnóstico combinado e nível de risco da falha – Estudo de Caso 2.

Nesse caso, o diagnóstico de operação sem falha, obtido por meio da aplicação do conhecimento heurístico, foi confirmado pelos valores limites do guia IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991).

c) Linhas de Ação Fornecidas pelo Modelo de Aplicação e Estratégias de Ação Definidas pelos Decisores

Para o transformador 2, as linhas de ação fornecidas pelo módulo 2, bem como as estratégias de ação definidas pelos decisores são mostradas no Quadro 6.11.

Linhas de Ação Plausíveis	Estratégias de Ação
<ul style="list-style-type: none"> - Manter o equipamento em operação e continuar com a estratégia tradicional de manutenção. - Manter o equipamento em operação e aumentar o intervalo entre manutenções preventivas. - Manter o equipamento em operação e suspender a manutenção preventiva. - Postergar a substituição do equipamento. 	<p>Estratégia Tradicional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspeção a cada 3 meses. • Manutenção preventiva a cada 6 anos. • Substituição após a falha terminal. <p>Estratégia 6:</p> <ul style="list-style-type: none"> • inspeção a cada 3 meses. • manutenção preventiva a cada 8 anos. • substituição após a falha terminal.

Quadro 6.11 – Linhas de ação e estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

d) Avaliação das Estratégias de Ação

d.1) Avaliação Clássica

Os parâmetros para a simulação da operação do equipamento são os mesmos estabelecidos para o caso 1.

d.1.1) Avaliação Técnica

Por meio da utilização do módulo 1, foram geradas as curvas de vida do equipamento, referentes às estratégias tradicional e 6, conforme mostrado na Figura 6.8, com o objetivo de verificar o efeito do aumento da periodicidade da manutenção sobre o nível de risco da falha terminal. Com a estratégia 6, observa-se uma redução não muito significativa da vida útil

estimada do equipamento de 35,2 para 32,3 anos, com custo da falha de R\$ 315.931,95.

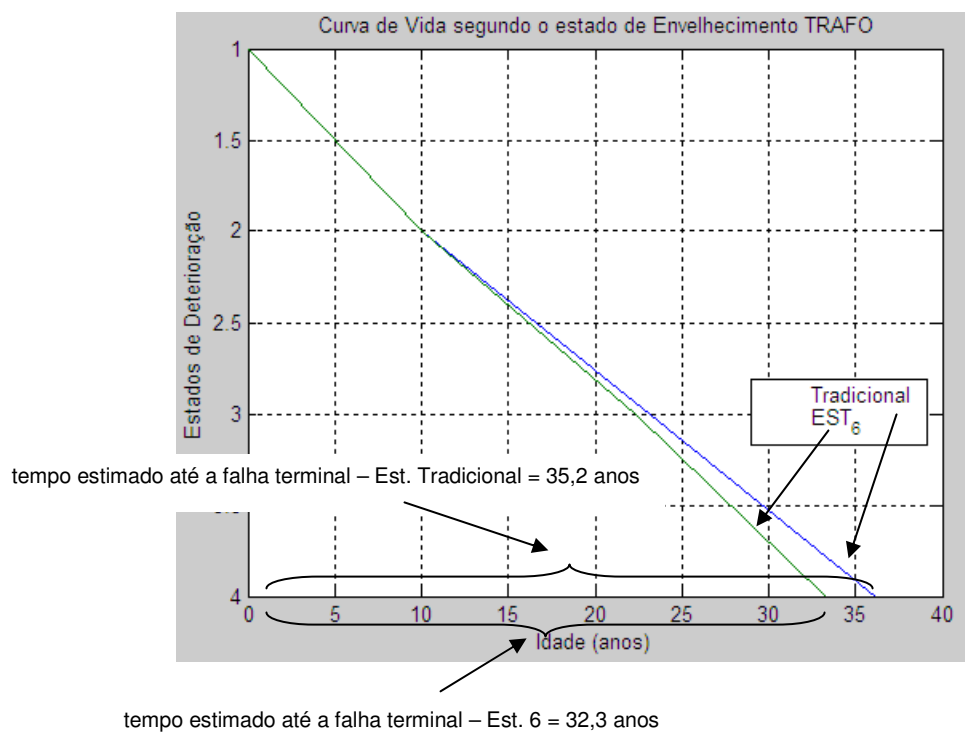


Figura 6.8 – Curvas de vida do transformador 2 – Estratégia Tradicional e Estratégia 6.

O nível de risco da falha, para a estratégia alternativa 6, foi avaliado, conforme o Quadro 6.12, a seguir.

Estratégia Alternativa	Nível de Risco da Falha Terminal e Grau de Pertinência
6	Baixo com $\mu = 0,26$ Muito Baixo com $\mu = 0,74$

Quadro 6.12 – Avaliação do nível de risco da falha para a estratégia 6.

Verifica-se uma situação de incerteza na avaliação do nível de risco da falha. Isso se deve ao fato de que a variável linguística “custo da falha terminal” (com valor numérico igual

a R\$ 315.931,95) apresenta grau de pertinência igual a 0,26 no conjunto *fuzzy* “Pequeno” e grau de pertinência igual a 0,74 no conjunto *fuzzy* “Muito Pequeno”. A fuzzyficação das variáveis “tempo até a falha terminal” e “custo da falha terminal” teve como base, as funções de pertinência apresentadas na Figura 5.17, da Subseção 5.7.3.

Nessa situação de incerteza, as duas regras mostradas na Figura 6.9 foram disparadas e o nível de risco da falha (consequente das duas regras) é avaliado como “Baixo”, com grau de pertinência igual a 0,26 e “Muito Baixo”, com grau de pertinência igual a 0,74.

```
(defrule Rrisco8
(declare (salience -40))
(or (TEMPOFALHA Moderado) (TEMPOFALHA Longo) (TEMPOFALHA MuitoLongo))
(PREJUIZO Pequeno)
=>
(assert (NRISCO Baixo))
)

(defrule Rrisco12
(declare (salience -40))
(or (TEMPOFALHA Moderado) (TEMPOFALHA Longo) (TEMPOFALHA MuitoLongo))
(PREJUIZO MuitoPequeno)
=>
(assert (NRISCO MuitoBaixo))
)
```

Figura 6.9 – Regras disparadas para a avaliação do nível de risco da falha – Estratégia 6.

Mesmo na presença da incerteza, observa-se ser aceitável o nível de risco da falha, considerando a estratégia alternativa 6. Assim, a estratégia de aumento da periodicidade da manutenção preventiva foi considerada plausível, dando-se prosseguimento à etapa de avaliação.

Por meio do módulo 1 do modelo de aplicação, a simulação da operação do equipamento, considerando um período de 40 anos, forneceu, para a avaliação técnica, os resultados apresentados na Tabela 6.6 e na Figura 6.10, a seguir.

	Estratégia Tradicional	Estratégia Alternativa 6
Indisponibilidade (h/ano)	$26,03 + 41,22 = 67,25$	$19,06 + 43,22 = 62,28$
Energia Esperada Não Suprida (MWh/ano)	$14.316,59 + 22.671,24 = 36.987,83$	$10.482,29 + 23.772,92 = 34.255,21$

Tabela 6.6 – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

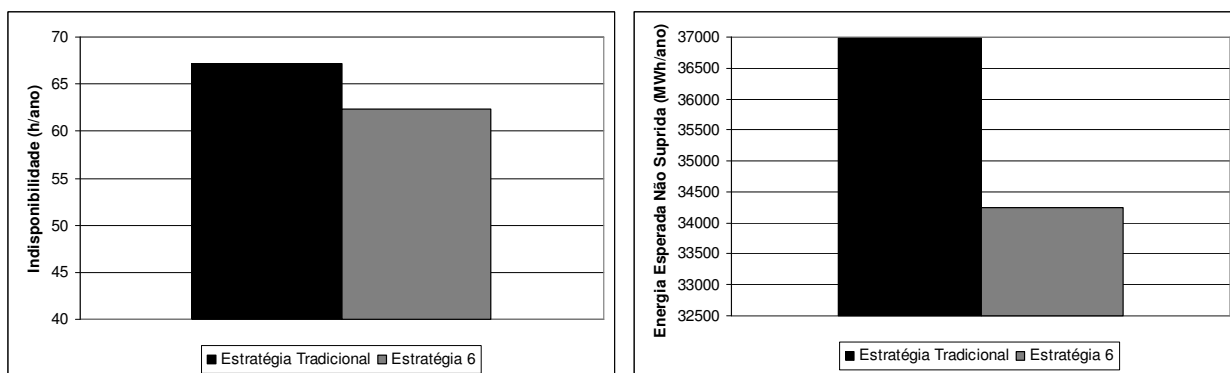


Figura 6.10 – Desempenho técnico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Observa-se que a alternativa de aumento da periodicidade da manutenção preventiva representada pela estratégia 6 resulta em uma menor indisponibilidade devido à manutenção e em uma maior indisponibilidade devido à falha. Considerando o balanço entre a indisponibilidade e a energia não suprida por manutenção e por falha, verifica-se que a estratégia apresenta um melhor desempenho. A análise econômica é apresentada a seguir.

d.1.2) Avaliação Econômica

Para a avaliação econômica das estratégias de ação, o módulo 1 forneceu os resultados

apresentados na Tabela 6.7.

A estratégia 6 apresentou menor custo de manutenção, maior custo de falha e de investimento, embora as diferenças não sejam muito significativas. Também com diferenças mínimas, a parcela variável por indisponibilidade é menor, para a estratégia 6, sendo um pouco maior a receita operacional.

Da mesma forma que no estudo de caso 1, os valores presentes do fluxo de caixa líquido das estratégias concorrentes estão bem próximos, com pequena vantagem para a estratégia 6, verificando-se uma dificuldade para a tomada de decisão.

	Estratégia Tradicional	Estratégia Alternativa 6
Custos de Administração e Operação (R\$)	371.274,32	371.199,88
Custos de Inspeção e Manutenção (R\$)	563.772,90	421.796,25
Custos da Falha (R\$)	680.155,64	738.823,54
Custos de Investimento (R\$)	1.723.382,03	1.909.529,78
Parcela Variável por Indisponibilidade (R\$)	6.742.790,47	6.498.351,06
Receita Operacional (R\$)	79.785.923,58	80.030.362,99
Lucro Mensal da Gestão do Negócio (R\$)	78.170.720,73	78.498.543,31
Lucro Operacional (R\$)	77.344.912,09	77.672.734,68
Lucro Líquido (R\$)	51.047.641,98	51.264.004,89
Fluxo de Caixa Operacional Líquido (R\$)	51.873.450,61	52.089.813,52
Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	50.150.068,59	50.180.283,74

Tabela 6.7 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Na Figura 6.11 são apresentados alguns índices de desempenho econômico, relativos às estratégias de ação concorrentes.

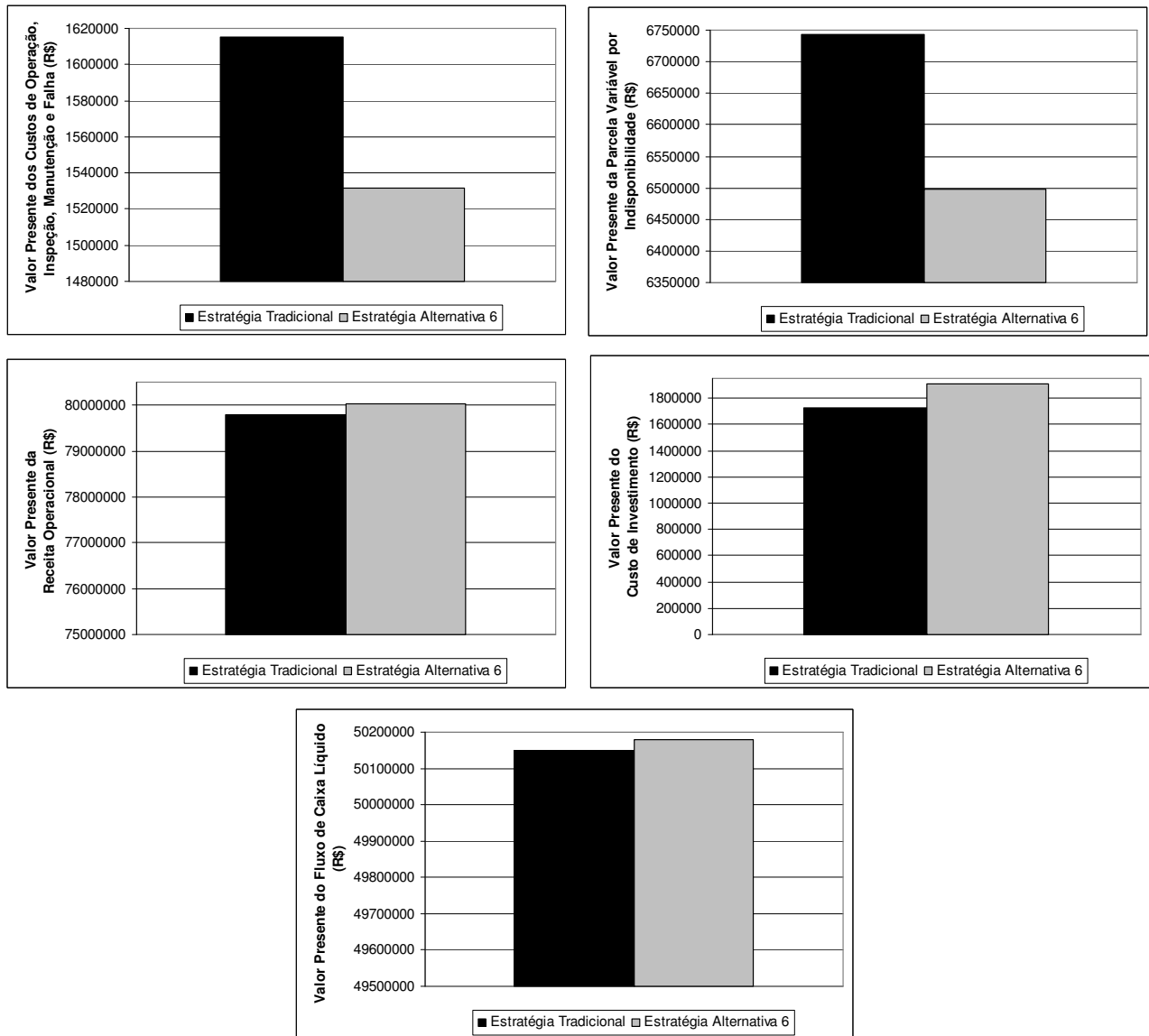


Figura 6.11 – Desempenho econômico das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

d.2) Avaliação Estratégica

A seguir, apresentam-se, para esse estudo de caso, os resultados obtidos com a avaliação estratégica.

d.2.1) Avaliação do Impacto Ambiental das Estratégias Alternativas

Inicialmente, apresentam-se, na Tabela 6.8, os desempenhos de cada estratégia, nos aspectos de avaliação qualitativa do impacto ambiental.

Estratégia Alternativa	Redução dos Riscos com o Manuseio, Transporte e Armazenamento de Resíduos		Utilização de Novas Tecnologias Menos Agressivas ao Meio Ambiente	
	Desempenho	Grau de Pertinência	Desempenho	Grau de Pertinência
Tradicional	Forte	1,0	Muito Fraco	1,0
6	Muito Forte	1,0	Muito Fraco	1,0

Tabela 6.8 – Desempenhos quanto ao impacto ambiental – Estudo de Caso 2.

A opção de aumento da periodicidade da manutenção, considerada pela estratégia 6, reduz os riscos com o manuseio, transporte e armazenamento de resíduos. No entanto, os desempenhos das duas estratégias concorrentes, no que diz respeito à utilização de novas tecnologias menos agressivas ao meio ambiente, é “Muito Fraco”, considerando que o equipamento só será substituído após a falha terminal, sendo que para a estratégia tradicional, esse evento foi estimado para daqui a 35,2 anos e para a estratégia 6, para daqui a 32,3 anos.

d.2.2) Inferência Causal para a Avaliação Estratégica

Com base nos valores apresentados nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8, a comparação dos desempenhos numéricos e ambiental associados aos conceitos-atributo do mapa *fuzzy*, mostrou a não existência de dominância de uma estratégia sobre a outra. Desse modo, foi necessário definir, por meio da inferência causal, aquela de maior efeito sobre o cumprimento da missão da empresa, considerando o cenário de preferências definido pelos decisores.

Para esse estudo de caso, o processo de inferência causal foi executado com base no mapa *fuzzy* mostrado na Figura 6.12, que representa um cenário caracterizado pela incerteza referente à definição da intensidade de algumas relações de causa-efeito. Observa-se, entre parêntesis, os graus de pertinência com os quais cada termo linguístico foi atribuído às

ligações, no caso do julgamento incerto. Nos casos em que o julgamento foi realizado com 100 % de certeza, a ausência de um valor numérico entre parêntesis, indica grau de pertinência unitário.

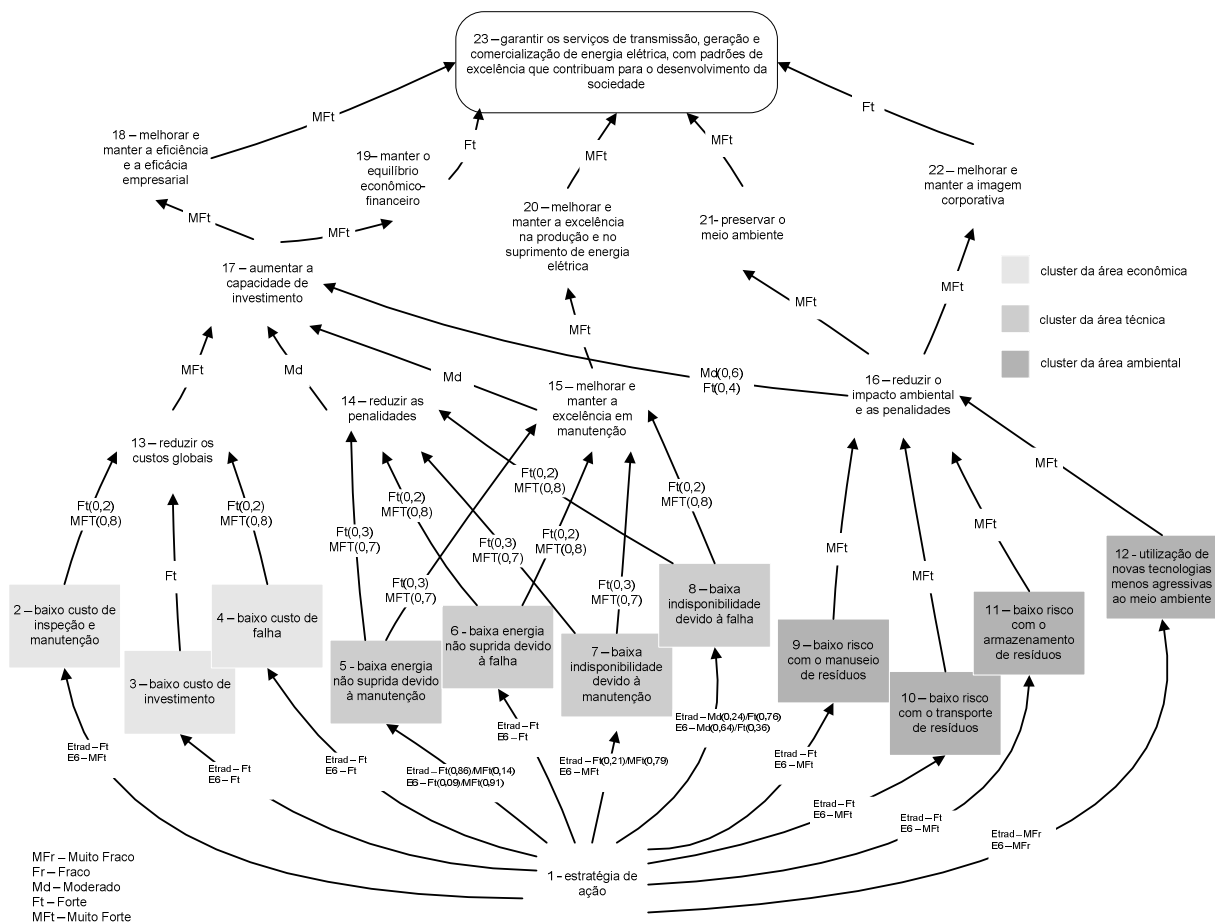


Figura 6.12 – Mapa fuzzy para o cenário de preferências dos decisores – Estudo de Caso 2.

Os Quadros 6.13 e 6.14 apresentam, para o transformador 2, os melhores desempenhos das duas estratégias concorrentes, nas três áreas de avaliação, por meio do mesmo processo de inferência utilizado para a avaliação das estratégias de ação relativas ao transformador 1.

Estratégia Tradicional			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte Muito Forte	0,3 0,7	1 – 7 – 15 – 20 – 23	4,67
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 – 3 – 13 – 17 – 18 – 23 1 – 3 – 13 – 17 – 19 – 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 9 – 16 – 21 – 23 1 - 9 – 16 – 22 – 23 1 - 10 – 16 – 21 – 23 1 - 10 – 16 – 22 – 23 1 - 11 – 16 – 21 – 23 1 - 11 – 16 – 22 – 23	4,0

Quadro 6.13 – Melhores desempenhos da estratégia tradicional.

Estratégia Alternativa 6			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte Muito Forte	0,3 0,7	1 – 5 – 15 – 20 – 23 1 - 7 – 15 – 20 – 23	4,67
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte Muito Forte	0,2 0,8	1 -2 -13 – 17 – 18 – 23	4,76
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 9 – 16 – 21 – 23 1 - 10 – 16 – 21 – 23 1 - 11 – 16 – 21 – 23	5,0

Quadro 6.14 – Melhores desempenhos da estratégia 6.

Na Figura 6.13 comparam-se os melhores desempenhos em cada área de avaliação.

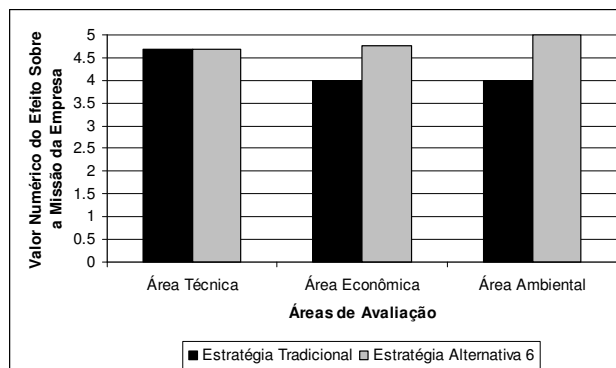
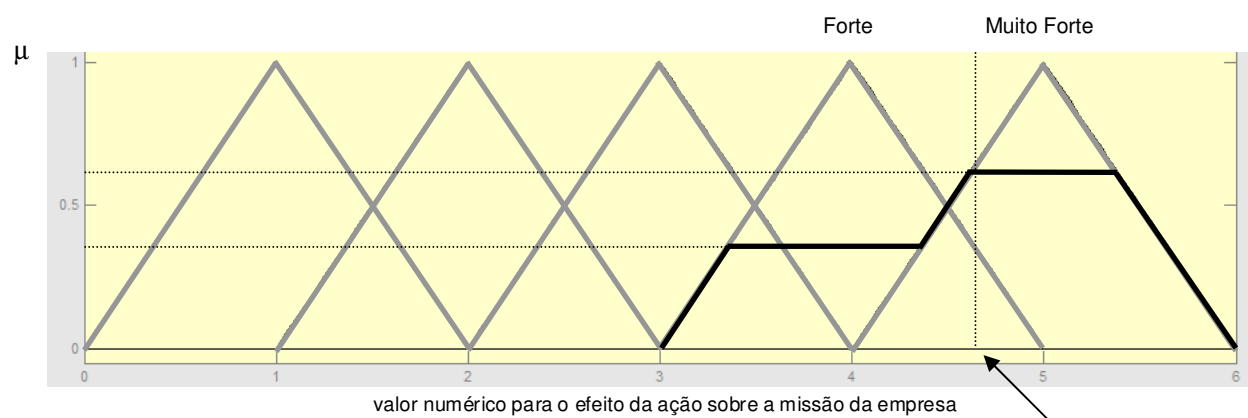


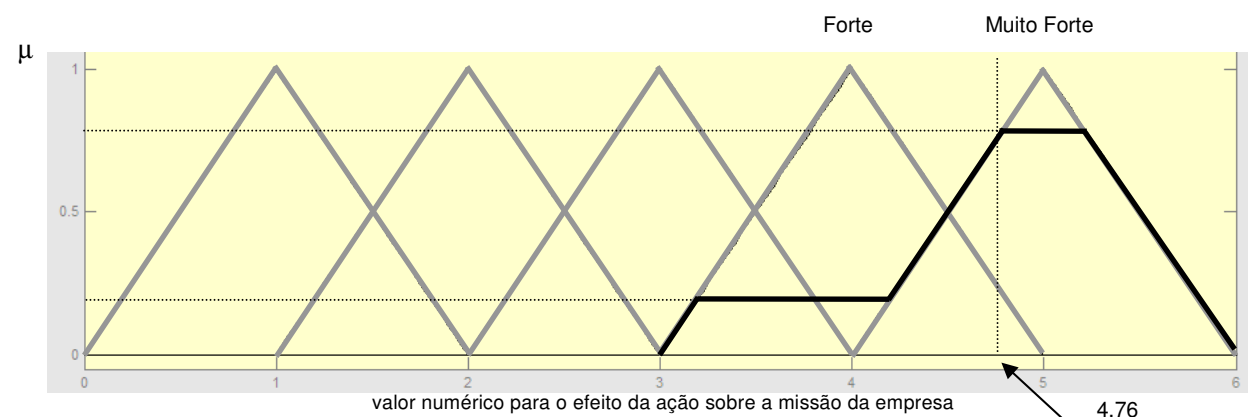
Figura 6.13 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas – Estudo de Caso 2.

Na área técnica as duas estratégias apresentam desempenhos qualitativos idênticos e na área econômica, o desempenho da estratégia 6 é superior, devido ao menor custo de inspeção e manutenção, já que essa atividade é executada com uma periodicidade maior. Quanto à área ambiental, a estratégia 6 maximiza o efeito sobre a missão da empresa, devido também ao aumento da periodicidade da manutenção e consequente redução dos riscos de manuseio, transporte e armazenamento de resíduos. Observa-se a dominância da estratégia 6 sobre a tradicional, o que sugere que, para o cenário de preferências dos decisores, a opção pelo aumento da periodicidade da manutenção preventiva é a melhor alternativa a ser adotada.

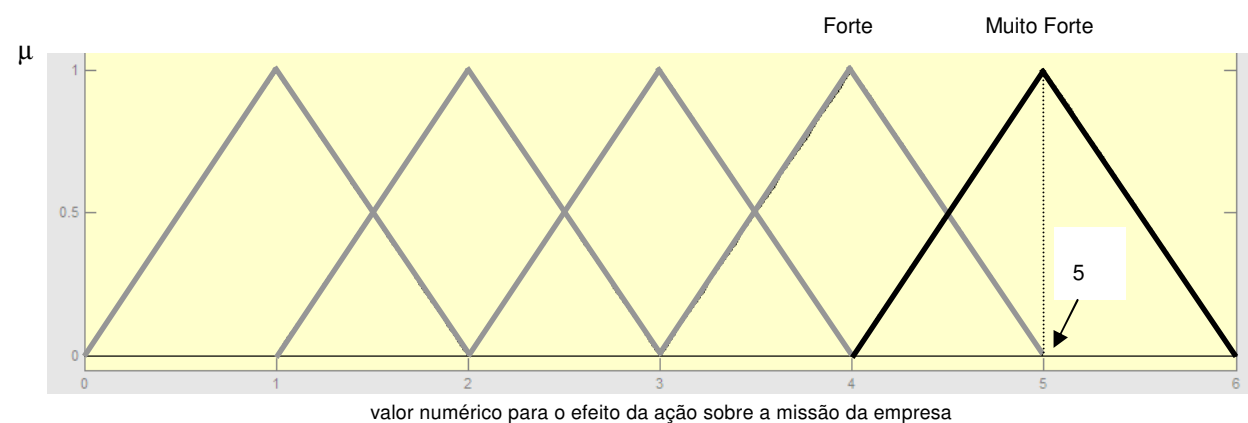
Além disso, mesmo com a existência de incertezas na rotulação de algumas das intensidades de influência entre conceitos, o processo de inferência causal permitiu, por meio da defuzzyficação do resultado qualitativo, a identificação de diferenças nos desempenhos das duas estratégias analisadas. Na Figura 6.14, apresenta-se a defuzzyficação (método do centróide) dos melhores efeitos apresentados pela estratégia 6 sobre a missão da empresa.



(a) Área Técnica



(b) Área Econômica



(c) Área Ambiental

Figura 6.14 – Representação gráfica da defuzzificação pelo método do centróide.

e) Tratamento das Incertezas

Como no exemplo de aplicação do módulo 3, apresentado no Apêndice 1, foi efetuado nesse caso, um estudo adicional para o tratamento das incertezas associadas aos resultados obtidos para a avaliação estratégica.

e.1) Definição de Limites Mínimos para os Graus de Pertinência

Em uma análise inicial, foram considerados valores entre 0,1 e 0,9 para o parâmetro α , que define um limite mínimo para os graus de pertinência dos resultados gerados pelo processo. Até um valor igual a 0,8, verificou-se a dominância da estratégia 6 sobre a estratégia tradicional. Os desempenhos das duas estratégias de ação, para $\alpha = 0,5$, são apresentados nos Quadros 6.15 e 6.16, a seguir.

Estratégia Tradicional			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	0,7	1 – 7 – 15 – 20 – 23	5,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 – 3 – 13 – 17 – 18 – 23 1 – 3 – 13 – 17 – 19 – 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 9 – 16 – 21 – 23 1 - 9 – 16 – 22 – 23 1 - 10 – 16 – 21 – 23 1 - 10 – 16 – 22 – 23 1 - 11 – 16 – 21 – 23 1 - 11 – 16 – 22 – 23	4,0

Quadro 6.15 – Melhores desempenhos da estratégia tradicional utilizando corte $\alpha = 0,5$.

Estratégia Alternativa 6			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	0,7	1 – 5 – 15 – 20 – 23 1 - 7 – 15 – 20 – 23	5,0
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	0,8	1 - 2 - 13 – 17 – 18 – 23	5,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 9 – 16 – 21 – 23 1 - 10 – 16 – 21 – 23 1 - 11 – 16 – 21 – 23	5,0

Quadro 6.16 – Melhores desempenhos da estratégia 6 utilizando corte $\alpha = 0,5$.

Na Figura 6.15, são comparados os melhores desempenhos das duas estratégias de ação, para $\alpha = 0,5$ e adicionalmente, para $\alpha = 0,8$.

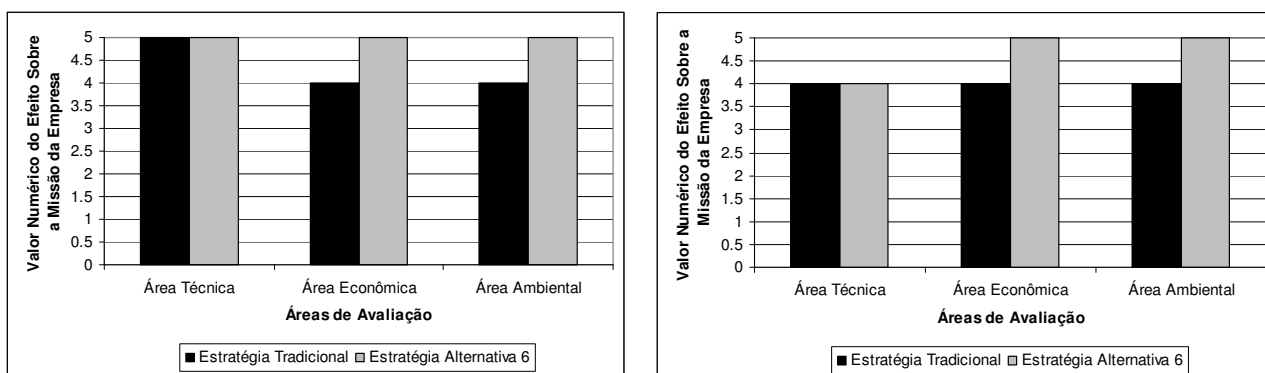


Figura 6.15 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas - Cortes $\alpha = 0,5$ e $0,8$.

Observa-se que, para $\alpha = 0,5$, a estratégia 6 maximiza o efeito sobre a missão da empresa, nas três áreas de avaliação e continua sendo mais atrativa, sob o ponto de vista estratégico de cumprimento da missão da empresa. Para $\alpha = 0,8$, a estratégia 6 continua dominante, porém, maximizando os desempenhos apenas nas áreas econômica e ambiental.

e.2) Inferência Causal sem a Consideração de Incertezas

Quando todos os resultados incertos são desconsiderados, obtém-se os desempenhos apresentados nos Quadros 6.17 e 6.18.

Pode-se observar, por meio dos resultados obtidos para esse estudo de caso, que a consideração e o tratamento matemático das incertezas inerentes aos julgamentos das intensidades das relações de causa-efeito no mapa causal *fuzzy*, permitiram a obtenção de resultados que traduzam as diferenças de desempenho entre as estratégias analisadas, subsidiando a tomada de decisão. Quando se pretende desconsiderar tais incertezas, o módulo 3 pode não fornecer resultados, como no caso analisado, comprometendo a tomada de decisão, por conta da omissão de informações referentes aos desempenhos das estratégias de ação alternativas e desse modo, talvez seja melhor efetuar os julgamentos de preferências, da forma como foi realizado no estudo de caso 1.

Estratégia Tradicional			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Não Fornece Resultado	---	---	---
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 3 - 13 - 17 - 18 - 23 1 - 3 - 13 - 17 - 19 - 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 9 - 16 - 21 - 23 1 - 9 - 16 - 22 - 23 1 - 10 - 16 - 21 - 23 1 - 10 - 16 - 22 - 23 1 - 11 - 16 - 21 - 23 1 - 11 - 16 - 22 - 23	4,0

Quadro 6.17 – Melhores desempenhos da estratégia tradicional desconsiderando as incertezas.

Estratégia Alternativa 6			
Área Técnica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Não Fornece Resultado	---	---	---
Área Econômica			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Forte	1,0	1 - 3 - 13 - 17 - 18 - 23 1 - 3 - 13 - 17 - 19 - 23	4,0
Área Ambiental			
Melhor Desempenho	Grau de Pertinência	Linha(s) de Argumentação	Valor Numérico após Defuzzyficação
Muito Forte	1,0	1 - 9 - 16 - 21 - 23 1 - 10 - 16 - 21 - 23 1 - 11 - 16 - 21 - 23	5,0

Quadro 6.18 – Melhores desempenhos da estratégia 6 desconsiderando as incertezas.

Na Figura 6.16, esses desempenhos são comparados, deixando claro o fato de que a desconsideração da incerteza pode impossibilitar a obtenção de alguns resultados, como no caso da avaliação estratégica da área técnica. Esse mesmo resultado foi obtido para um valor de α igual a 0,9.

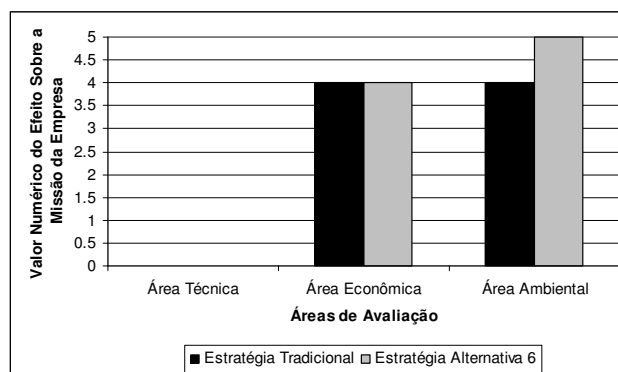


Figura 6.16 – Melhores desempenhos das estratégias alternativas desconsiderando as incertezas – Estudo de Caso 2.

6.7 Conclusões

A metodologia proposta permite a avaliação das estratégias de ação para o gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força, considerando duas abordagens distintas: a clássica, tradicionalmente adotada no setor elétrico, baseada em critérios técnicos e econômicos quantificáveis e uma abordagem alternativa, associada ao cumprimento da missão da empresa. Além disso, ações plausíveis para a solução do problema são fornecidas pelo modelo de aplicação, com base na análise das condições do equipamento, sob o ponto de vista da ocorrência de falhas incipientes e com base em uma análise probabilística do nível de risco da falha terminal.

A avaliação clássica, por meio do valor presente do fluxo de caixa líquido pode resultar, como nos estudos de caso apresentados, em valores muito próximos, o que pode caracterizar, aos olhos dos decisores, uma situação de indiferença e de dificuldades para a tomada de decisão. Os índices numéricos fornecidos pelo módulo 1 do modelo de aplicação poderiam ser utilizados diretamente para uma análise multicritério de cada estratégia de ação, no entanto, a consideração desses índices não permitiria, de forma direta, como acontece por meio da utilização dos mapas causais, a avaliação estratégica de cumprimento da missão da empresa e a consideração das preferências dos decisores, inclusive com a possibilidade de julgamentos caracterizados pela incerteza.

Nos estudos de caso apresentados, os decisores tiveram a oportunidade de expor, por meio da construção de um mapa causal *fuzzy*, suas preferências, no que diz respeito aos aspectos relevantes ao cumprimento da missão da empresa, ampliando a avaliação das ações alternativas para além do alcance de objetivos táticos de minimização de custos ou de maximização de confiabilidade. No modelo de aplicação, tais julgamentos podem ser efetuados com 100 % de certeza quanto às preferências dos decisores, ou as intensidade de relação de influência entre conceitos do mapa podem ser rotuladas com mais de um termo linguístico, atribuindo-se aos mesmos, graus de pertinência diferentes e nesse caso, o processo

de inferência permite o tratamento matemático das incertezas, por meio da Lógica *Fuzzy*.

O caráter multicritério da avaliação ficou evidente quando da construção do mapa causal, já que os diversos conceitos-atributo existentes são de áreas distintas (técnica, econômica e ambiental) e a avaliação local, ou seja, em cada um desses conceitos-atributo possibilita a identificação dos pontos fortes e fracos de cada estratégia de ação e a geração de novas estratégias de ação a serem avaliadas. Isso faz da metodologia proposta um instrumento de reflexão, não só para a geração de novas alternativas para a solução do problema de gerenciamento do ciclo de vida de transformadores de força, mas também para o amadurecimento das preferências dos decisores quanto aos aspectos relevantes sob o ponto de vista estratégico.

7

CONCLUSÕES GERAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões Gerais

Nesse trabalho, apresentou-se inicialmente, com base na literatura existente, o conceito de Gerenciamento de Ativos no setor elétrico. Visando destacar seu caráter estratégico, tal atividade foi associada ao bom desempenho econômico, ao atendimento dos requisitos de qualidade, continuidade e segurança, exigidos por consumidores e pelo agente regulador e ao cumprimento da missão das empresas.

Os diversos trabalhos citados na revisão bibliográfica sugerem um tratamento multicritério ao problema da definição e da avaliação de estratégias alternativas para o gerenciamento do ciclo de vida dos equipamentos, com o desafio de considerar aspectos de difícil quantificação, como por exemplo, o impacto ambiental associado às atividades de manutenção. Com isso, a teoria do Apoio à Decisão Multicritério aparece como ferramenta importante, tanto para a estruturação, como para a avaliação das estratégias de ação e como forma de auxílio à tomada de decisão, não mais baseada, como nos métodos da Pesquisa Operacional, na minimização ou maximização de um critério único e sim, na busca de soluções que permitam a consideração de diversos critérios, com maior ou menor grau de importância dentro da atividade das empresas.

O Apoio à Decisão Multicritério, incorporado à metodologia proposta, permite que os

valores e objetivos dos diversos indivíduos participantes, de forma direta ou indireta do processo de tomada de decisão, sejam considerados, observando-se que os pontos de vista dos responsáveis pela decisão, devem representar na realidade, a política que orienta as atividades empresariais. Essa abordagem torna possível a obtenção de soluções que permitam o alcance dos objetivos de mais alto nível no ambiente corporativo.

Como contribuição importante, foi proposta uma metodologia que é caracterizada pela agregação das diversas etapas do Gerenciamento de Ativos, ou seja, tem-se, com o modelo de aplicação, uma ferramenta que parte da avaliação das condições do equipamento em análise, sob o ponto de vista da existência de falhas incipientes na isolação, passando pela avaliação do nível de risco da falha terminal, ao final da sua vida útil e pela proposição de linhas de ação a serem seguidas, alcançando por fim, a etapa de avaliação de um conjunto de estratégias de ação definidas pelos participantes. Para a execução de cada etapa, foram empregadas a técnica *Dissolved Gas Analysis* (IEEE, 1991), as técnicas de simulação *First Passage Time* (Da Silva e Endrenyi, 1994) e *Monte Carlo* (Billinton e Lian, 1993) e a metodologia dos Sistemas de Inferência *Fuzzy* (Tanscheit, 2003), cuja qualidade dos resultados fornecidos vem sendo comprovada e devidamente documentada na literatura.

O Gerenciamento de Ativos baseado nas condições dos equipamentos aparece como uma das direções a serem seguidas pelas empresas, já que diversos autores, tais como Endrenyi, Anders e Da Silva (1998) destacam a sua importância, no que diz respeito ao melhor gerenciamento do ciclo de vida desses equipamentos. Esse procedimento deve permitir uma maior eficácia na execução das atividades de manutenção, evitando paradas programadas desnecessárias, reduzindo as paradas não programadas, aumentando os índices de confiabilidade e reduzindo, adicionalmente, os custos de manutenção, de falha e de aquisição de novos equipamentos, bem como as penalidades por indisponibilidade, o que deve resultar em maiores receitas e lucros com a prestação de serviço na área de energia elétrica.

Outra contribuição da metodologia proposta, diz respeito à consideração, por meio dos

Sistemas de Inferência *Fuzzy*, do conhecimento especializado e do tratamento matemático das incertezas inerentes ao problema. A utilização dos mapas causais *fuzzy* possibilita a consideração do julgamento com incertezas, além de ser uma importante ferramenta de caráter construtivista para a sistematização do conhecimento existente nas empresas. O conhecimento especializado e as incertezas foram modelados na forma de regras de inferência, caracterizadas pelo emprego de termos linguísticos, emulando a forma natural de raciocínio dos seres humanos.

O modelo de aplicação permite avaliar diversas estratégias de ação, alternativas à estratégia tradicional de GA adotada por uma empresa, sendo tais estratégias geradas pela variação da periodicidade e do tipo de atividade de manutenção preventiva executada. Além disso, o tempo para a substituição do equipamento existente por um novo pode ser avaliado, permitindo inclusive que o equipamento seja substituído apenas após sua falha terminal. Os resultados apresentados no Capítulo 6 demonstram o alcance dos objetivos específicos propostos no Capítulo 1, em especial, a avaliação das condições e do nível de risco da falha terminal do equipamento em análise, bem como a geração, avaliação e comparação de estratégias de ação alternativas.

Considerando-se ainda a avaliação das estratégias de ação, outro ponto que merece destaque, como contribuição desse trabalho, é a combinação da abordagem clássica, tradicionalmente adotada pelas empresas do setor elétrico, com uma abordagem estratégica, baseada na otimização multiobjetivo e direcionada ao cumprimento da missão da empresa, fazendo com que a tomada de decisão deixe de considerar apenas o alcance de objetivos táticos, representativos dos valores e objetivos do corpo técnico e passe a considerar objetivos estratégicos, associados aos indivíduos que ocupam posição de gerência. Observa-se a possibilidade de geração de novas estratégias de ação, por conta da avaliação dos resultados apresentados pelas estratégias definidas e avaliadas inicialmente.

A aplicação da metodologia foi focada, nesse trabalho, nos transformadores de força,

essenciais aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, existindo grande quantidade de trabalhos e de dados relativos a esses equipamentos. No entanto, entende-se que tal metodologia poderá ser aplicada a outros equipamentos, considerando-se as especificidades dos mesmos e a disponibilidade de informações confiáveis.

Finalmente, pode-se concluir que, para a eficácia de uma metodologia de gerenciamento do ciclo de vida de equipamentos, em especial com função de transmissão, deve-se considerar, além de critérios econômicos e de confiabilidade, facilmente quantificáveis, critérios subjetivos como o impacto ambiental e, principalmente, em nível estratégico, o impacto de ações alternativas sobre o cumprimento da missão da empresa.

7.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Como propostas para a continuidade do trabalho aqui apresentado, podem-se destacar:

- A melhoria, por meio da implementação de um sistema *neuro-fuzzy*, do módulo 2 do modelo de aplicação, no que tange à análise de gases dissolvidos no óleo isolante para o diagnóstico de falhas incipientes.
- A inserção de ensaios físico-químicos, para enriquecer a base de conhecimento do módulo 2 e aumentar a quantidade de informações referentes às condições do equipamento, mais especificamente, às condições da isolamento sólida e líquida.
- A extensão da metodologia para aplicação a outros equipamentos dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, com a implementação de um modelo de aplicação semelhante ao apresentado nesse trabalho.
- A avaliação quantitativa do impacto ambiental, por meio, por exemplo, da determinação dos prejuízos econômicos associados aos eventuais acidentes quando do

manuseio, transporte a armazenamento dos resíduos provenientes das atividades de manutenção e até mesmo quando da ocorrência de falhas catastróficas dos equipamentos, além da consideração de outros aspectos tais como custos referentes ao tratamento de áreas contaminadas, penalidades e indenizações.

- A integração dos três módulos do modelo de aplicação em um único ambiente computacional, constituindo um Sistema de Suporte à Decisão (SSD).

ANEXO 1 - MÉTODOS DE ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE DE TRANSFORMADORES

Neste anexo apresentam-se três métodos para o diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de força. A aplicação desses métodos tem como objetivo, identificar processos de falha originados pela deterioração da isolação sólida e líquida do equipamento, podendo se manifestar na forma de sobreaquecimento ou de descargas elétricas. No guia IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991) e em Castillo (2003) e Morais (2004), são descritos os mais conhecidos métodos de análise de gases, entre eles os métodos apresentados a seguir.

A.1.1 Método NBR-7274

Este método é apresentado na norma NBR-7274 (ABNT, 1982), sendo baseado no método de Rogers (Rogers, 1975) e sua aplicação permite a identificação das condições de operação normal ou de falha incipiente. As três relações de gases listadas a seguir, são consideradas para a identificação da natureza da falha incipiente:

- Relação 1: Acetileno/Etileno (C_2H_2/C_2H_4).
- Relação 2: Metano/Hidrogênio (CH_4/H_2).
- Relação 3: Etileno/Etano (C_2H_4/C_2H_6).

Os valores apresentados por essas relações geram códigos, conforme a Tabela A.1, para a posterior identificação da natureza da falha.

Faixa de Valores	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
$0,1 > R$	0	1	0
$0,1 < R < 1$	1	0	0
$1 < R < 3$	1	2	1
$R > 3$	2	2	2

Tabela A.1 – Códigos gerados pelas relações de gases – Método NBR-7274.
Fonte: ABNT (1982).

Em seguida, utiliza-se a Tabela A.2 para diagnosticar operação sem falha ou para a identificação da natureza de uma falha, em função da combinação de códigos.

Natureza da Falha	Relações		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem Falha	0	0	0
Descargas Parciais de Baixa Energia	0	1	0
Descargas Parciais de Alta Energia	1	1	0
Descargas de Baixa Energia	1-2	0	1-2
Descargas de Alta Energia	1	0	2
Descargas de Baixa Energia	2	0	1
Descargas de Baixa Energia	2	0	2
Falha Térmica Baixa (< 150°C)	0	0	1
Falha Térmica Média (150°C – 300°C)	0	2	0
Falha Térmica Alta (300°C – 700°C)	0	2	1
Falha Térmica Muito Alta (> 700°C)	0	2	2

Tabela A.2 – Identificação da natureza da falha – Método NBR-7274.
Fonte: ABNT (1982).

A.1.2 Método de Doernenburg

O método de Doernenburg considera as seguintes relações de gases:

- Relação 1: Metano/Hidrogênio (CH_4/H_2).
- Relação 2: Acetileno/Etileno (C_2H_2/C_2H_4).
- Relação 3: Acetileno/Metano (C_2H_2/CH_4).
- Relação 4: Etano/Acetileno (C_2H_6/C_2H_2).

Inicialmente procura-se verificar a existência de falha, por meio das concentrações de H_2 , CH_4 , C_2H_2 e C_2H_4 . Se pelo menos um desses gases apresentar uma concentração duas vezes maior que os valores apresentados na tabela A.3 e um dos três gases restantes apresentar uma concentração maior que os valores da mesma tabela, considera-se que o equipamento opera com falha, cuja natureza deve ser identificada.

Gás Chave	Concentração (ppm)
Hidrogênio (H ₂)	100
Metano (CH ₄)	120
Monóxido de Carbono (CO)	350
Acetileno (C ₂ H ₂)	35
Etileno (C ₂ H ₄)	50
Etano (C ₂ H ₆)	65

Tabela A.3 – Valores limites para operação com falha - Método de Doernenburg.
Fonte: IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991).

Em seguida, verifica-se a validade das relações de gases. Se pelo menos um dos gases que compõem cada uma das relações utilizadas pelo método apresentar uma concentração maior que os valores da Tabela A.3, considera-se que as relações de gases são significativas e o método pode ser utilizado para a detecção de falhas incipientes. Caso contrário, considera-se que as relações não são significativas e o método não pode ser utilizado.

Uma vez validadas as relações de gases, a consulta aos valores limites da Tabela A.4, permite identificar a natureza da falha incipiente.

Natureza da Falha	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ /CH ₄
Ponto Quente	> 1	< 0,75	> 0,4	< 0,3
Descarga de Baixa Intensidade	< 0,1	não significativa	> 0,4	< 0,3
Descarga de Alta Intensidade	< 1 e > 0,1	> 0,75	< 0,4	> 0,3

Tabela A.4 – Identificação da natureza da falha – Método de Doernenburg.
Fonte: IEEE Std C57.104-1991 (IEEE, 1991).

A.1.3 Método de Duval

No método de Duval, considera-se os percentuais de metano (CH_4), acetileno (C_2H_2) e etileno (C_2H_4), com relação ao somatório das concentrações desses três gases:

$$m_{\%} = \frac{\text{CH}_4}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4} \times 100 \quad (\text{A.1.1})$$

$$a_{\%} = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4} \times 100 \quad (\text{A.1.2})$$

$$y_{\%} = \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4} \times 100 \quad (\text{A.1.3})$$

Em que:

$m_{\%}$ - quantidade percentual de metano.

$a_{\%}$ - quantidade percentual de acetileno.

$y_{\%}$ - quantidade percentual de etileno.

Com as quantidades percentuais obtidas para cada gás, consulta-se a Tabela A.5, como forma de identificar a natureza da falha na isolação do equipamento.

Tipo de Falha	$m_{\%}$	$a_{\%}$	$y_{\%}$
Pontos Quentes	0 – 96	0 – 16	0 – 100
Arco de Alta Energia	0 – 59	16 – 75	25 – 84
Arco de Baixa Energia	0 – 84	16 – 100	0 – 25
Descargas Internas	96 – 100	0 – 4	0 – 4

Tabela A.5 – Identificação da natureza da falha - Método de Duval.
Fonte: Duval (1989).

ANEXO 2 - MÉTODOS PARA A SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Inicia-se este anexo apresentando-se a definição de Processos de Markov e a modelagem de equipamentos elétricos por meio de Cadeias de Markov, como fundamentação teórica para a simulação da operação do transformador de força em análise, quando o mesmo é submetido a uma determinada estratégia de manutenção. Em seguida, apresenta-se a formulação do método *First Passage Time* e o critério de convergência do método *Monte Carlo*.

A.2.1 Processos Estocásticos e Processos de Markov

Em Camargo (1981), define-se Processo Estocástico como um fenômeno que varia de forma imprevisível ao longo do tempo, sendo que, sequências inteiras desse fenômeno, observadas em ocasiões diferentes e sob condições idênticas, apresentarão resultados diferentes. Pela definição anterior, verifica-se a necessidade da definição de um intervalo de tempo para a observação do comportamento do fenômeno em análise. Se as observações forem realizadas em intervalos de tempo discretos, o processo é dito a parâmetros discretos. Se as observações forem contínuas no tempo, o processo é dito a parâmetros contínuos.

O fenômeno em observação pode ser representado por uma variável aleatória $X(t)$, ou mais especificamente, pelos valores apresentados por essa variável ao longo do tempo, sendo que o conjunto de valores ou estados possíveis forma seu espaço de estado. Algumas variáveis podem apresentar valores contínuos, pertencentes, por exemplo, ao conjunto dos números reais e nesse caso, o espaço de estado é contínuo. Caso os valores sejam discretos, o espaço de estado será discreto.

Processos de Markov, segundo Camargo (1981), representam uma classe especial de processo estocástico, para os quais o valor da variável aleatória X em um determinado instante

de tempo, depende apenas do valor dessa variável no instante anterior. Desse modo, a probabilidade P_{ij} de transição de uma variável aleatória X , para o estado j no instante t_2 , sabendo que a mesma se encontra no estado i , no instante t_1 , é dada por:

$$P_{ij} = P(X(t_2) = j \mid X(t_1) = i) \quad (\text{A.2.1})$$

A.2.2 Modelagem de Equipamentos Elétricos por meio de Cadeias de Markov

Processos de Markov a parâmetros contínuos e estados discretos podem ser representados por Cadeias de Markov, sendo muito utilizadas para a análise de confiabilidade de equipamentos elétricos sujeitos à renovação. Na Figura A.2.1 ilustra-se uma cadeia de Markov a dois estados, representando as condições de operação e de falha de um equipamento, sendo conhecidas as taxas de falha (λ) e de reparo (μ).

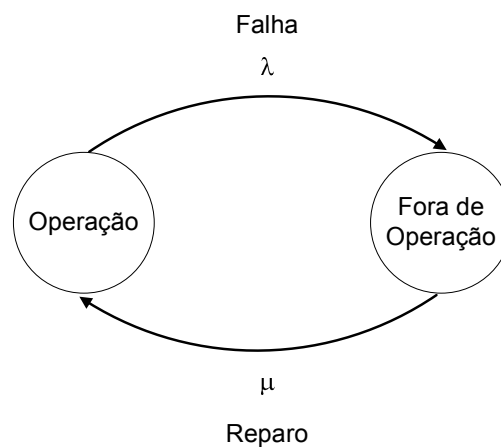


Figura A.2.1 – Cadeia de Markov a dois estados.
Fonte: Camargo (1981).

As probabilidade de estado estacionário referentes às condições de operação (P_1) e fora de operação (P_2) são dadas pelas Equações A.2.2 e A.2.3, respectivamente.

$$P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (\text{A.2.2})$$

$$P_2 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (\text{A.2.3})$$

Sendo as taxas de falha e de reparo constantes, as Equações A.2.4 e A.2.5 fornecem os tempos médios para a falha (T_1) e de reparo (T_2).

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A.2.4})$$

$$T_2 = \frac{1}{\mu} \quad (\text{A.2.5})$$

Por fim, a frequência com a qual se encontram os dois estados da cadeia da Figura A.2.1, pode ser obtida pela igualdade:

$$f = P_1 \times \lambda = P_2 \times \mu \quad (\text{A.2.6})$$

A.2.3 Simulação da Operação do Equipamento por meio do Método *First Passage Time*

Da Silva e Endrenyi (1994) expõem uma questão emergente nos estudos de confiabilidade de equipamentos elétricos: considerando um equipamento caracterizado pela deterioração ao longo do tempo, qual o tempo estimado para a passagem de um estado para outro, em uma cadeia de Markov que o representa ?

A resposta a tal questão permite estimar o tempo até a falha do equipamento, informação importante quando se pretende avaliar o efeito de uma estratégia de gerenciamento de ciclo de vida, sobre o tempo restante de vida útil do mesmo. Desse modo, os autores definem o *First Passage Time – FPT*, entre os estados i e j , como o tempo médio para que o equipamento alcance o estágio j , dado que o mesmo se encontra, no início da análise, no estágio i . Sendo o estado j um estado de falha, o *FPT* fornece o tempo estimado até a falha do equipamento.

A seguir, apresenta-se o Método da Combinação de Estados (Da Silva e Endrenyi, 1994), para o qual o *FPT* entre os estados i e j é estimado considerando-se todos os outros estados da cadeia de Markov, agrupados em um estado S , conforme a Figura A.2.2.

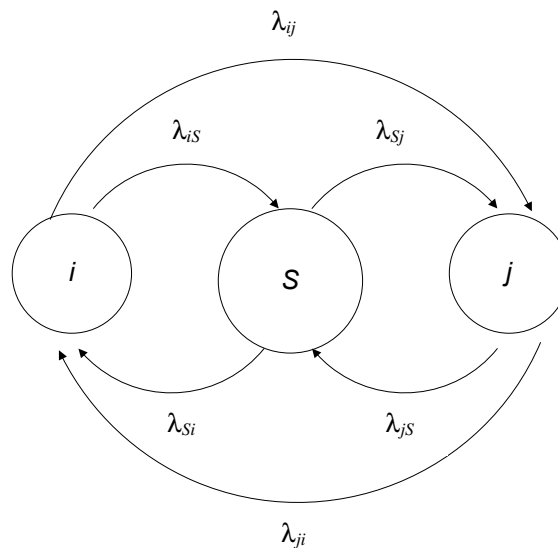


Figura A.2.2 – Representação iSj de uma cadeia de Markov para o cálculo do FPT_{ij} .
Fonte: Da Silva e Endrenyi (1994).

As taxas de transição λ_{ij} e λ_{ji} são obtidas diretamente da cadeia de Markov original e as taxas λ_{is} , λ_{si} , λ_{js} e λ_{sj} , são obtidas conforme formulação a seguir, sendo λ_{iz} e λ_{zi} , também obtidos da cadeia de Markov original.

$$\lambda_{iS} = \sum_{z \in S} \lambda_{iz} \quad (\text{A.2.7})$$

$$\lambda_{Si} = \frac{\sum_{z \in S} (p_z \times \lambda_{zi})}{\sum_{z \in S} p_z} \quad (\text{A.2.8})$$

Em que:

p_z – probabilidade de estado estacionário no estado $z \in S$.

Considerando que o equipamento se encontra atualmente no estado i , definem-se q_j e q_S , como as probabilidades de que a primeira transferência de i seja para j e para S , respectivamente. Nesse caso, $q_S = 1 - q_j$.

Adicionalmente, definem-se, com base nas Equações (A.2.4) e (A.2.5), os tempos médios de permanência nos estados i e S , respectivamente, como:

$$T_i = \frac{1}{\lambda_{ij} + \lambda_{iS}} \quad (\text{A.2.9})$$

$$T_S = \frac{1}{\lambda_{Si} + \lambda_{Sj}} \quad (\text{A.2.10})$$

Se o estado S foi alcançado primeiro, existem duas possibilidades:

1º) retornar para o estado i , com probabilidade r_i ;

2º) ir para o estado j , com probabilidade $r_j = 1 - r_i$.

Assim, o tempo estimado para a primeira transição entre os estados i e j (FPT_{ij}) pode ser obtido pela Equação A.2.11.

$$FPT_{ij} = q_j \cdot T_i + q_s \{T_i + r_j \cdot T_s + r_i [T_s + q_j \cdot T_i + q_s (T_i + r_j \cdot T_s + r_i (...))]\} \quad (A.2.11)$$

A Equação A.2.11 pode ser reescrita como uma soma de progressões geométricas, originando a Equação A.2.12, a seguir.

$$\begin{aligned} FPT_{ij} = & T_i \cdot q_j (1 + r_i \cdot q_s + r_i^2 \cdot q_s^2 + \dots) + T_i (q_s + r_i \cdot q_s^2 + r_i^2 \cdot q_s^3 + \dots) + \\ & T_s (q_s \cdot r_j + q_s^2 \cdot r_i \cdot r_j + q_s^3 \cdot r_i^2 \cdot r_j + \dots) + T_s (q_s \cdot r_i + q_s^2 \cdot r_i^2 + \dots) \end{aligned} \quad (A.2.12)$$

Efetuando-se a soma das progressões geométricas da Equação A.2.12, tem-se:

$$FPT_{ij} = \frac{(T_i + q_s \cdot T_s)}{(1 - r_i \cdot q_s)} \quad (A.2.13)$$

Como:

$$q_j = \frac{\lambda_{ij}}{(\lambda_{ij} + \lambda_{is})} \quad (A.2.14)$$

$$r_i = \frac{\lambda_{si}}{(\lambda_{si} + \lambda_{sj})} \quad (A.2.15)$$

Resulta:

$$FPT_{ij} = \frac{\lambda_{si} + \lambda_{sj} + \lambda_{is}}{\lambda_{si} \cdot \lambda_{ij} + \lambda_{sj} \cdot \lambda_{ij} + \lambda_{sj} \cdot \lambda_{is}} \quad (A.2.16)$$

A.2.4 Critério de Convergência do Método *Monte Carlo*

A confiabilidade dos resultados do processo de simulação por meio do método *Monte Carlo* depende do número total de simulações efetuadas. Conforme a Figura 5.5 apresentada no Capítulo 5, verifica-se a existência de um número mínimo de simulações, dado pela multiplicação do número inicial de amostras pelo número de simulações por amostra e após essa primeira sequência de simulações, realiza-se pela primeira vez, o teste de convergência do processo.

O critério de convergência, conforme Nuñez (2004) considera como variável, o Valor Presente do Fluxo de Caixa Líquido – VPFCL, definido na Subseção 5.6.3, Equação 5.7 e, para um número total de simulações NA, uma sequência de valores O_j , $j = 1, 2, \dots, NA$. Segundo Tondello (2001), o valor médio (\hat{O}) e a variância $V(T)$, estimados para o VPFCL, considerando NA amostras, são dados, respectivamente, pelas Equações A.2.17 e A.2.18.

$$\hat{O} = \frac{1}{NA} \sum_{j=1}^{NA} O_j \quad (A.2.17)$$

$$V(T) = \frac{1}{NA-1} \sum_{j=1}^{NA} (O_j - \hat{O})^2 \quad (A.2.18)$$

Da Equação A.2.18, define-se a variância do estimador como:

$$V(\hat{O}) = \frac{V(T)}{NA} \quad (A.2.19)$$

E o teste de convergência é realizado considerando-se o coeficiente de variação do estimador, dado pelo desvio padrão do estimador normalizado (Tondello, 2001).

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\hat{O})}}{\hat{O}} \quad (\text{A.2.20})$$

Quando β for menor ou igual a um valor pré-estabelecido β_o , ocorreu a convergência do processo. Caso contrário, incrementa-se o número de amostras e o processo é repetido, de acordo com o número de simulações por amostra, até que se obtenha a convergência.

APÊNDICE 1 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS MÓDULOS 2 e 3

Apresentam-se neste apêndice, exemplos de aplicação dos módulos 2 e 3 do modelo de aplicação da metodologia proposta.

A.3.1 Exemplo de Aplicação do Módulo 2

Nesta subseção, procura-se ilustrar a aplicação do módulo 2 do modelo de aplicação, na execução das etapas de diagnóstico de falhas incipientes, de avaliação do nível de risco da falha terminal e da proposição de linhas de ação que orientam a definição das estratégias de ação a serem avaliadas.

a) Fatos Iniciais (variáveis numéricas de entrada)

Concentrações de Gases:

- Hidrogênio (H_2) – 100 ppm.
- Metano (CH_4) – 966 ppm.
- Acetileno (C_2H_2) – 57 ppm.
- Etileno (C_2H_4) – 1.810 ppm.
- Etano (C_2H_6) – 299 ppm.
- Monóxido de Carbono (CO) – 36 ppm.
- Dióxido de Carbono (CO_2) – 756 ppm.

Tempo Estimado até a Falha Terminal = 12 anos

Custo da Falha Terminal = R\$ 2.187.081,93

b) Inferência Causal para o Diagnóstico de Falha Incipiente

Seguindo o fluxograma da Figura 5.6, mostrado na Subseção 5.7.1, foi aplicado inicialmente, o conhecimento heurístico dos especialistas. Assim, as variáveis “concentração de acetileno”, “concentração de etileno”, “concentração de hidrogênio” e “relação entre dióxido de carbono e monóxido de carbono” foram fuzzyficadas, sendo convertidas em

variáveis linguísticas, com os seguintes termos linguísticos associados:

- concentração de acetileno – “não é Baixa”
- concentração de etileno – “não é Baixa”
- concentração de hidrogênio – “Baixa”
- relação dióxido de carbono/monóxido de carbono – “não é Aceitável”

Na Figura A.3.1 apresenta-se, como exemplo, a fuzzyficação da variável “concentração de acetileno”, com base na função de pertinência definida para o termo linguístico (conjunto *fuzzy*) “Baixa”. Verifica-se que o valor de 57 ppm não pertence a esse conjunto *fuzzy* e assim, a concentração de acetileno “não é Baixa”, ou em outras palavras, é “Baixa” com grau de pertinência igual a “zero”.

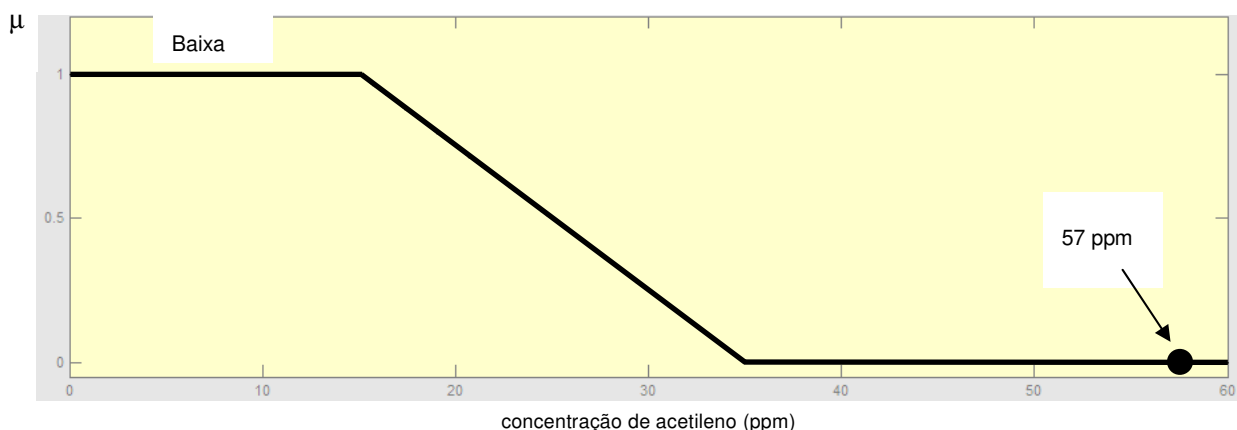


Figura A.3.1 – Fuzzyficação da variável “concentração de acetileno”.

Com os termos linguísticos listados anteriormente, para as concentrações de acetileno, etileno, hidrogênio e para a relação entre dióxido de carbono e monóxido de carbono, foi disparada, pelo motor de inferência, a regra mostrada na Figura A.3.2. Nessa regra, que utiliza o operador “or” (ou), o antecedente é satisfeito pelas concentrações de acetileno e etileno, bem como pela relação dióxido de carbono/monóxido de carbono. Assim, o consequente que

representa operação com falha é gerado como um novo fato.

```
(defrule Rheur2
  (or (ACETILENO not Baixa) (ETILENO not Baixa) (HIDROGENIO not Baixa) (DIOX_MONOX not Aceitavel))
=>
  (assert(HEURDIAG CF))
  (assert(CONFIRMA Nao))
)
```

Figura A.3.2 – Regra disparada para definir operação com falha - Conhecimento Heurístico.

O processo de inferência segue agora por meio das regras que visam identificar a natureza da falha incipiente, inicialmente, utilizando-se as versões *fuzzy* dos métodos NBR-7274 e Doernenburg e em seguida, por meio do diagnóstico combinado.

Para o método NBR-7274, a fuzzyficação da variável “relação acetileno/etileno”, que apresenta um valor numérico igual a 0,03, é mostrada na Figura A.3.3. Nessa figura aparece representada apenas a função de pertinência que representa o termo linguístico (conjuntos *fuzzy*) “Baixa”. A representação de todas as funções de pertinência aparece na Figura 5.13, no Capítulo 5.

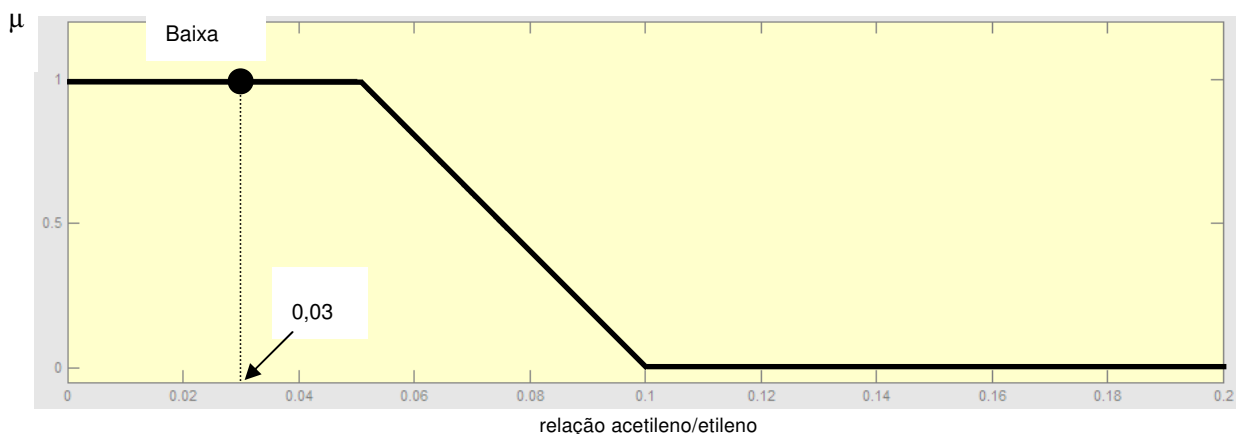


Figura A.3.3 – Fuzzyficação da variável “relação acetileno/etileno” – Método NBR-7274.

Com a fuzzyficação, conforme exemplificado na Figura A.3.3, as variáveis linguísticas características do método NBR-7274 passam a ser caracterizadas pelos seguintes termos:

- relação acetileno/etileno – “Baixa”
- relação metano/hidrogênio – “Alta”
- relação etileno/etano – “Alta”

Com esses termos linguísticos, três regras foram disparadas, na sequência mostrada na Figura A.3.4, inicialmente para a definição dos códigos que posteriormente serão utilizados para a identificação da natureza da falha.

```
(defrule Rnbr9
  (declare (salience -5))
  (ETILETAN Alta)
=>
  (assert(COD3 Dois))
)

(defrule Rnbr6
  (declare (salience -5))
  (or (METAHIDRO Media2) (METAHIDRO Alta))
=>
  (assert(COD2 Dois))
)

(defrule Rnbr1
  (declare (salience -5))
  (ACETETIL Baixa)
=>
  (assert(COD1 Zero))
)
```

Figura A.3.4 – Regras disparadas para a obtenção dos códigos do método NBR-7274.

Essas regras definiram, para os códigos característicos do método NBR-7274:

Código 1 = “zero”

Código 2 = “dois”

Código 3 = “dois”

Para essa combinação de códigos, o diagnóstico de falha incipiente pelo método NBR-7274, foi definido como falha térmica, pelo disparo da seguinte regra.

```

(defrule Rnbr18
  (declare (salience -15))
  (CONFIRMA Nao)
  (COD1 Zero)
  (COD2 Dois)
  (COD3 Dois)
=>
  (assert(NBRDIAG FT))
)

```

Figura A.3.5 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico pelo método NBR-7274.

O processo de inferência prossegue, considerando o método de Doernenburg e as variáveis características do mesmo, definidas de forma linguística, por meio da fuzzyficação:

- concentração de hidrogênio – “não é maior que 100”
- concentração de metano – “maior que 120”
- concentração de acetileno – “maior que 35”
- concentração de etileno – “maior que 50”
- concentração de etano – “maior que 65”
- relação metano/hidrogênio – “maior que 1”
- relação acetileno/etileno – “menor que 0,75”
- relação etano/acetileno – “maior que 0,4”
- relação acetileno/metano – “menor que 0,3”

A fuzzyficação da variável “relação etano/acetileno” é exemplificada na Figura A.3.6.

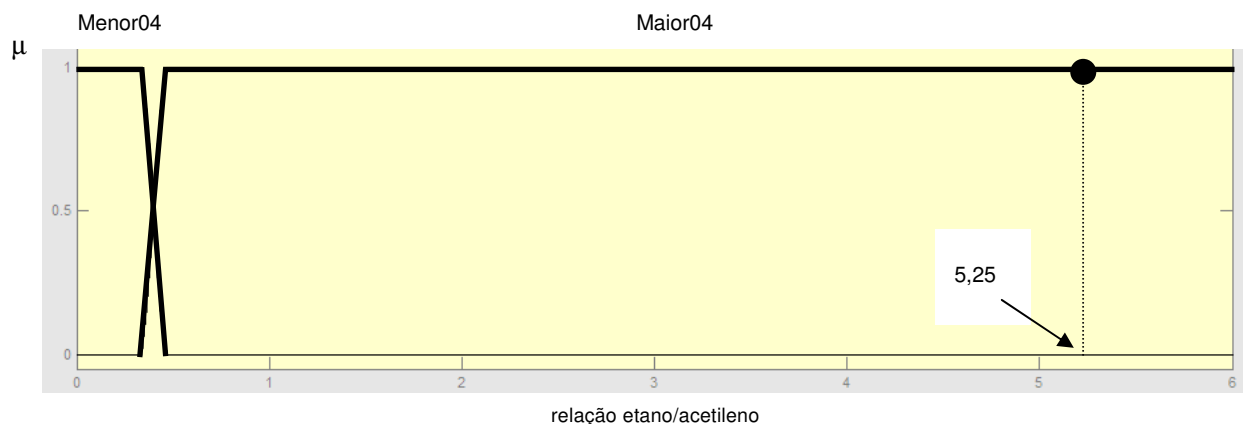


Figura A.3.6 – Fuzzyficação da variável “relação etano/acetileno” – Método de Doernenburg.

Para essas variáveis, o motor de inferência dispara, em sequência, as regras mostradas na Figura A.3.7, que confirmam a existência de falha (regras Rdoer 2 e Rdoer4) e validam as relações de gases, para que o método possa ser utilizado para a identificação da natureza da falha (Rdoer5).

```
(defrule Rdoer2
(declare (salience -20))
(CONFIRMA Nao)
(METANO Maior240)
(or (HIDROGENIO Maior100) (ACETILENO Maior35) (ETILENO Maior50))
=>
(assert(DOERFALHA Sim))
)

(defrule Rdoer4
(declare (salience -20))
(CONFIRMA Nao)
(ETILENO Maior100)
(or (HIDROGENIO Maior100) (METANO Maior120) (ACETILENO Maior35))
=>
(assert(DOERFALHA Sim))
)

(defrule Rdoer5
(declare (salience -20))
(CONFIRMA Nao)
(DOERFALHA Sim)
(or (HIDROGENIO Maior100) (METANO Maior120) (ACETILENO Maior35) (ETILENO Maior50) (ETANO
Maior65))
=>
(assert(DOERVALIDO Sim))
)
```

Figura A.3.7 – Regras disparadas para a confirmação da existência de falha e para a validação das relações de gases pelo método de Doernenburg.

Após a validação das relações de gases, o diagnóstico de falha térmica fornecido pelo método de Doernenburg foi obtido pelo disparo da regra mostrada na Figura A.3.8.

```
(defrule Rdoer7
(declare (salience -25))
(CONFIRMA Nao)
(DOERVALIDO Sim)
(METAHIDRO Maior1)
(ACETETIL Menor075)
(ETANOACET Maior04)
(ACETMETA Menor03)
=>
(assert(DOERDIAG FT))
)
```

Figura A.3.8 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico pelo método de Doernenburg.

Observa-se que os diagnósticos fornecidos pelos dois métodos são coincidentes, não havendo, portanto, a necessidade de recorrer ao método de Duval. A regra mostrada na Figura A.3.9 estabelece o diagnóstico combinado.

```
(defrule Rcomb4
(declare (salience -35))
(NBRDIAG FT)
(DOERDIAG FT)
=>
(assert(DGADIAG FT))
)
```

Figura A.3.9 – Regra disparada para a obtenção do diagnóstico combinado.

c) Processo de Inferência para a Avaliação do Nível de Risco da Falha Terminal

Para a avaliação do nível de risco da falha terminal, as variáveis “tempo até a falha terminal” e “custo da falha terminal”, convertidas para variáveis linguísticas, apresentam os seguintes termos linguísticos associados:

- tempo até a falha terminal – “Longo”
- custo da falha terminal – “Moderado” com grau de pertinência igual a 0,25.
“Grande” com grau de pertinência igual a 0,75.

O valor numérico da variável “custo da falha terminal” está situado em uma região de

incerteza das funções de pertinência, conforme mostrado na Figura A.3.10 e por isso, as duas regras mostradas na Figura A.3.11, são disparadas para a avaliação do nível de risco da falha.

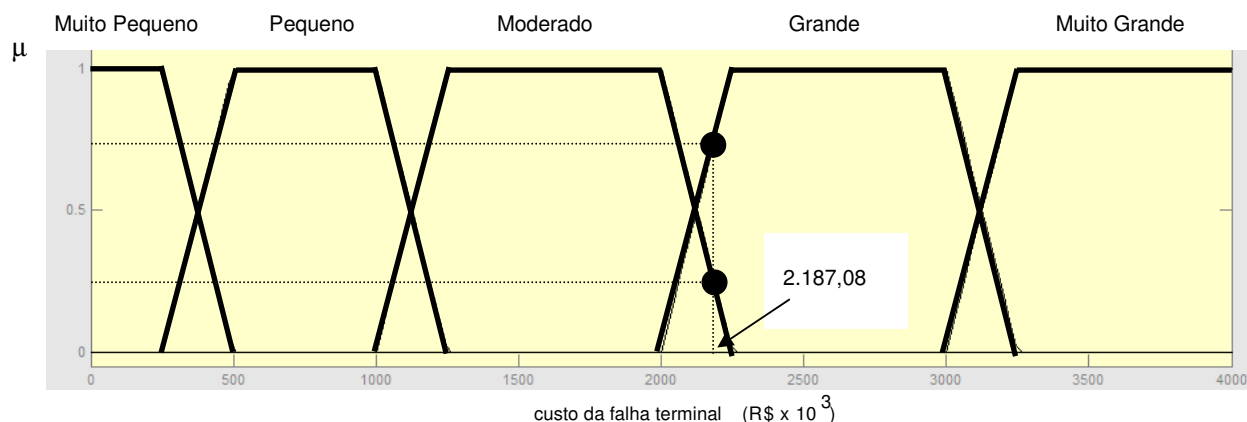


Figura A.3.10 – Fuzzyficação da variável “custo da falha terminal”.

```
(defrule Risco5
  (declare (salience -40))
  (or (TEMPOFALHA Longo) (TEMPOFALHA MuitoLongo))
  (PREJUIZO Grande)
=>
  (assert (NRISCO Toleravel))
)

(defrule Risco7
  (declare (salience -40))
  (or (TEMPOFALHA Longo) (TEMPOFALHA MuitoLongo))
  (PREJUIZO Moderado)
=>
  (assert (NRISCO Baixo))
)
```

A.3.11 – regras disparadas para a avaliação do nível de risco da falha terminal.

Com isso, o nível de risco da falha terminal do equipamento é avaliado como “Tolerável”, com grau de pertinência igual a 0,75 e “Baixo”, com grau de pertinência igual a 0,25 e nesse caso, as incertezas referentes à avaliação do nível de risco da falha são irrelevantes, já que os níveis “Tolerável” e “Baixo” resultam em um mesmo grupo de ações plausíveis.

Em uma situação como a representada nesse exemplo, pode-se utilizar o conceito de cortes α ¹¹ (Klir e Yuan, 1995), definindo-se que fatos com grau de pertinência inferior ao valor α não sejam gerados, o que corresponde a um recurso que permite limitar o grau de incerteza do processo de inferência. Assim, considerando-se $\alpha = 0,5$, o fato “nível de risco Baixo” não teria sido gerado. Já para um valor unitário para α , o que caracteriza uma opção pela desconsideração de qualquer incerteza, o módulo 2 não teria fornecido qualquer avaliação para o nível de risco da falha.

d) Proposição das Linhas de Ação Plausíveis

As linhas de ação plausíveis, utilizadas para orientar a definição de estratégias de ação para gerenciar o ciclo de vida do equipamento, são propostas, como resultado final da utilização do módulo 2, com base no diagnóstico de falhas incipientes e na avaliação do nível de risco da falha terminal. Os resultados obtidos fazem com que o motor de inferência dispare a regra mostrada na Figura A.3.12, que define como plausíveis as linhas de ação pertencentes ao grupo 1, do Quadro 5.3, mostrado na Subseção 5.7.3.

```
(defrule Rlinhas1
  (declare (salience -50))
  (or (DGADIAG FE) (DGADIAG FT) (NRISCO MuitoGrave) (NRISCO Grave))
=>
  (assert (GRUPO Um))
)
```

Figura A.3.12 – Regra disparada para a proposição das linhas de ação plausíveis.

Deve-se observar que, a utilização do operador “or” (ou) nessa regra, o simples fato de ter sido diagnosticada a operação com falha térmica, já faz com que sejam propostas tais linhas de ação, mesmo sendo baixo o nível de risco da falha.

¹¹ No ambiente *Fuzzy Clips*, no qual foi implementado o módulo 2 a consideração dos cortes α é feita por meio do comando “set-alpha-value”.

e) Árvore de Busca do Processo de Inferência Executado pelo Módulo 2

Na Figura A.3.13 apresenta-se a árvore de busca como forma de ilustrar o encadeamento de regras efetuado pelo motor de inferência. Fatos iniciais e fatos novos, gerados durante o processo de inferência, fazem com que o motor de inferência efetue a inserção de regras em uma agenda. Tais regras devem ser disparadas para gerar fatos novos, dando sequência à inserção de regras na agenda, até a obtenção do resultado final do processo.

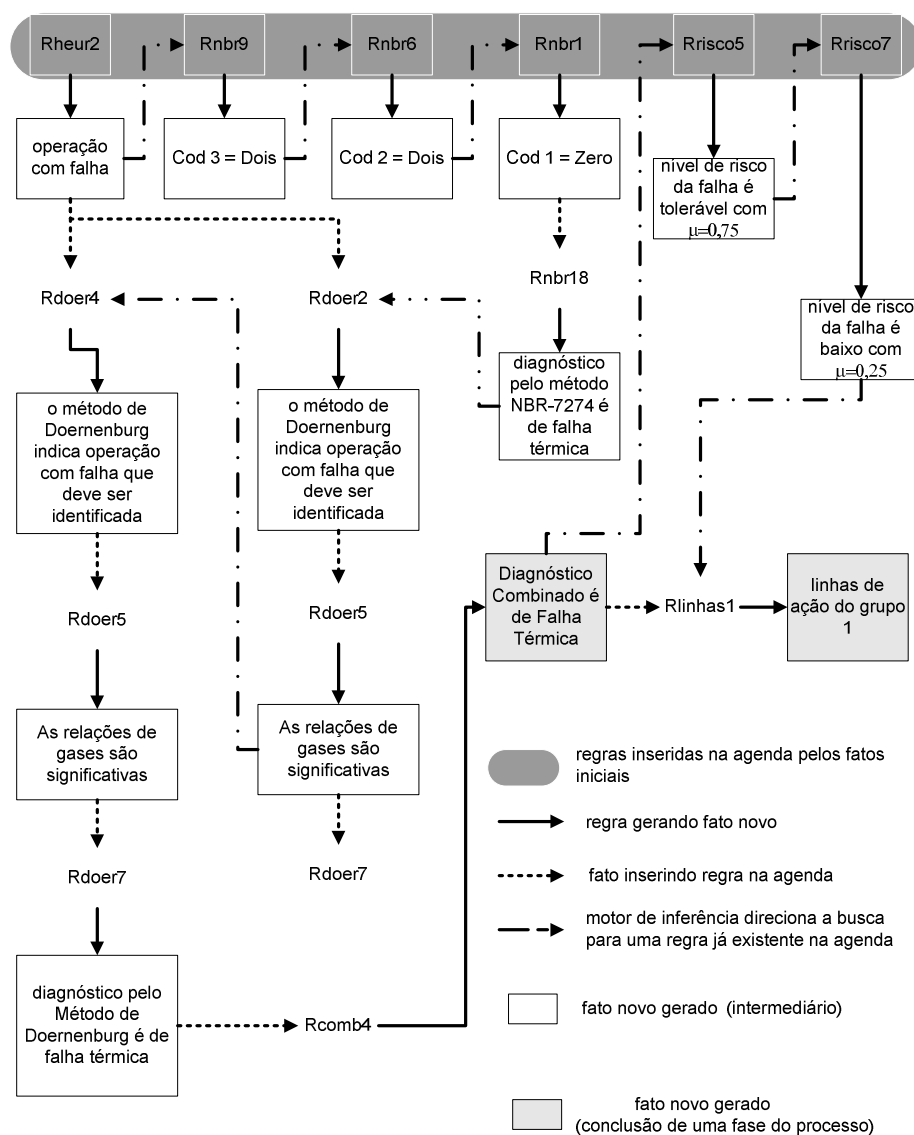


Figura A.3.13 – Árvore de busca para o diagnóstico de falha incipiente.

Utilizou-se nesse exemplo, o modo de busca em profundidade ou *Depth-first*, para o qual o motor de inferência sempre avalia a última regra inserida na agenda. O processo de inferência segue por um determinado caminho, até que um novo fato gerado não introduza outras regras na agenda e nesse caso, o motor de inferência redireciona a busca.

A.3.2 Exemplo de Aplicação do Módulo 3

a) Construção do Mapa Causal *Fuzzy* e Valores Numéricos de Entrada

Na Figura A.3.14, ilustra-se o mapa causal *fuzzy* utilizado nesse exemplo.

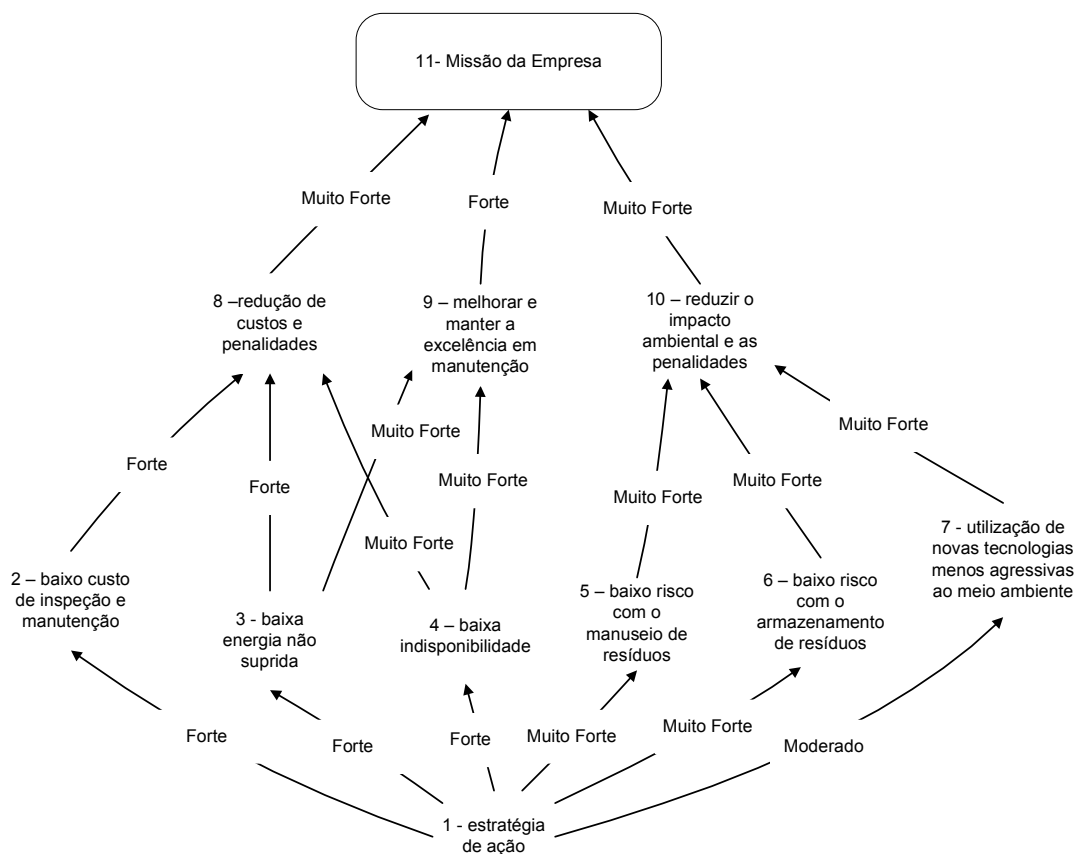


Figura A.3.14 – Exemplo de mapa causal *fuzzy*.

No exemplo de mapa mostrado na Figura A.3.14, o conceito 1 representa uma estratégia de ação a ser avaliada, sendo denominado conceito-ação e o conceito 11, chamado de conceito-missão, representa a missão da empresa. Os conceitos-atributo 2, 3 e 4, representam os índices fornecidos pelo módulo 1 e que foram selecionados pelos decisores e a avaliação ambiental está sendo considerada com a inclusão dos conceitos-atributo 5, 6 e 7. Por fim, os conceitos intermediários 8, 9 e 10 são considerados conceitos-meio. O mapa causal apresentado aqui como exemplo representa um modelo simplificado do mapa construído e utilizado nos estudos de aplicação da metodologia proposta, apresentados no Capítulo 6.

No módulo 3, implementado na forma de um sistema *fuzzy*, considera-se cada relação de causa-efeito do mapa causal, como uma variável linguística, cujo termo linguístico, ou a combinação de termos linguísticos, deve ser obtido por meio da fuzzyficação de um valor numérico de entrada, definido conforme descrito a seguir.

1º) Valores numéricos para as ligações entre o conceito-ação e um conceito-atributo

Correspondem ao desempenho da estratégia de ação naquele aspecto que está sendo representado pelo conceito-atributo. Como exemplo, no mapa da Figura A.3.14, considera-se a intensidade e_{1-2} da ligação 1-2, que representa a relação de causa-efeito entre o conceito-ação e o conceito-atributo “baixo custo de inspeção e manutenção”. As funções de pertinência para esse aspecto são mostradas na Figura A.3.15 e um custo, em valor presente, de R\$ 700.000,00, faz com que a intensidade da relação seja rotulada pelo termo “Moderado”, com um grau de pertinência unitário, ou seja, com 100 % de certeza.

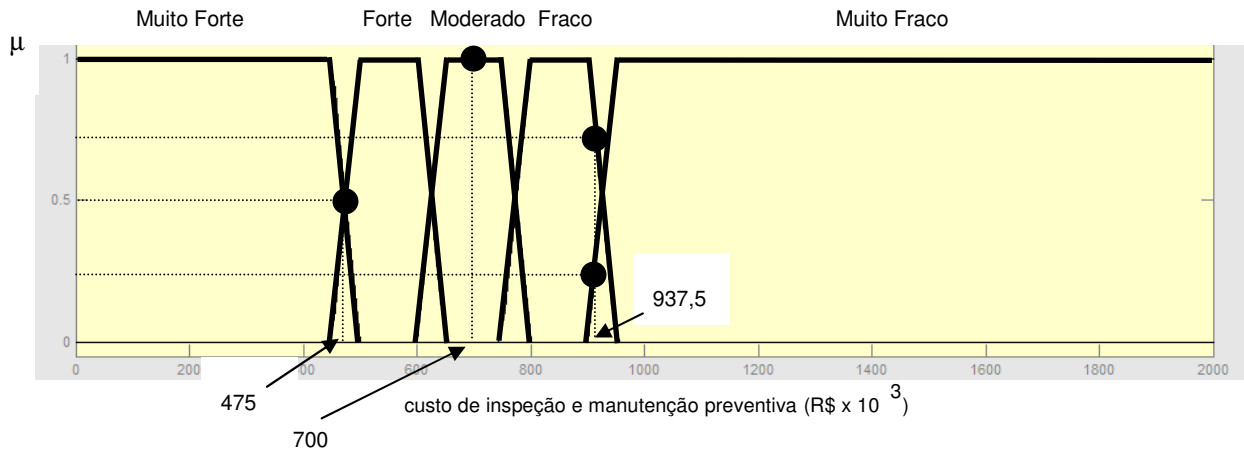


Figura A.3.15 – Fuzzyficação da variável “custo de inspeção e manutenção preventiva”.

Para um custo de inspeção e manutenção igual a R\$ 475.000,00, a mesma intensidade seria rotulada pelos termos “Forte” e “Muito Forte”, com graus de pertinência iguais a 0,5 e para um custo de R\$ 937.500,00, essa intensidade seria rotulada pelos termos “Muito Fraco” e “Fraco”, com graus de pertinência iguais a 0,25 e 0,75, respectivamente. Nesses dois últimos casos, tem-se situações de incerteza que devem ser tratadas matematicamente, no processo de inferência, por meio da Lógica *Fuzzy*.

2º) Valores numéricos para as demais ligações do mapa

Considera-se aqui, as ligações entre um conceito-atributo e um conceito-meio, entre dois conceitos-meio e entre um conceito-meio e o conceito-missão. As intensidades das relações de causa-efeito entre esses conceitos devem ser obtidas, qualitativamente, por meio do julgamento dos decisores. Para cada termo linguístico ou conjunto *fuzzy* definido para rotular as ligações do mapa, deve-se atribuir um valor numérico de entrada, definido com base nas funções de pertinência mostradas na Figura A.3.16.

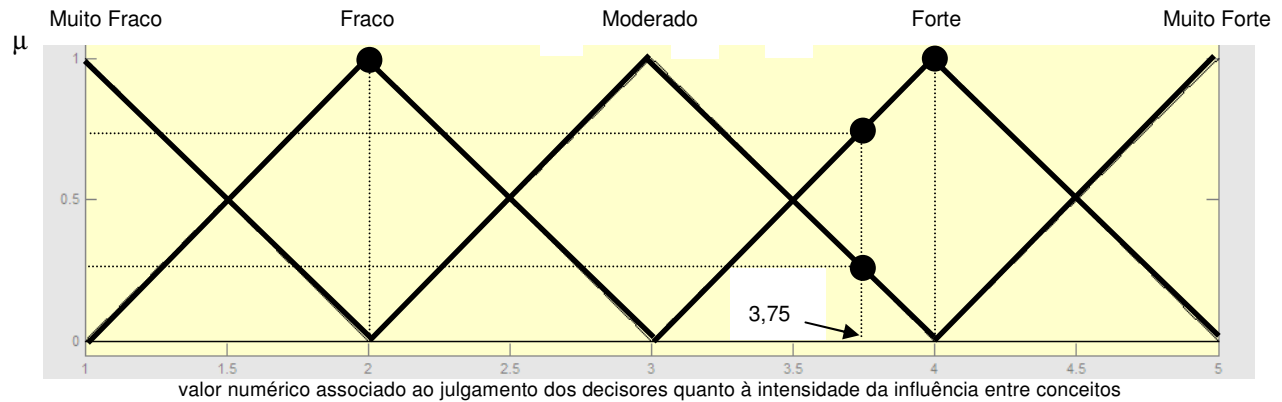


Figura A.3.16 – Fuzzyficação das intensidades das ligações intermediárias.

Tais funções de pertinência são definidas matematicamente como a seguir:

Conjunto “Muito Fraco”: $y = 2 - x$ ($1 \leq x \leq 2$)

Conjunto “Fraco”: $y = x - 1$ ($1 \leq x \leq 2$)

$y = 3 - x$ ($2 \leq x \leq 3$)

Conjunto “Moderado”: $y = x - 2$ ($2 \leq x \leq 3$)

$y = 4 - x$ ($3 \leq x \leq 4$)

Conjunto “Forte”: $y = x - 3$ ($3 \leq x \leq 4$)

$y = 5 - x$ ($4 \leq x \leq 5$)

Conjunto “Muito Forte”: $y = x - 4$ ($4 \leq x \leq 5$)

Como exemplo, pode-se considerar a situação em que os decisores tenham definido

como “Forte” a intensidade $e_{2,8}$ da relação de causa-efeito da ligação 2-8 do mapa da Figura A.3.14, que representa o efeito do “baixo custo de inspeção e manutenção” sobre a “redução de custos e penalidades”. Nesse caso, o valor numérico correspondente a esse rótulo linguístico, extraído das funções de pertinência mostradas na Figura A.3.16, e que deve ser fornecido como variável de entrada ao módulo 3, é “4”. Caso a intensidade da relação de causa-efeito dessa mesma ligação tenha sido definida pelo termo “Fraco”, o valor numérico de entrada correspondente, deve ser igual a “2”.

Situações de incerteza quanto ao julgamento dos decisores podem surgir, como por exemplo, se os decisores julgam que a intensidade relativa à ligação 2-8 é “Forte”, mas pode também ser “Moderado”, com um grau de certeza menor, o que caracteriza uma situação de incerteza quanto ao julgamento qualitativo, o valor numérico de entrada pode ser, por exemplo “3,75”, o que estabelece que a intensidade é “Forte” com grau de pertinência igual a 0,75 e “Moderado” com grau de pertinência igual a 0,25.

c) Inferência Causal

Conforme formulação apresentada na Subseção 5.8.1, obtém-se os efeitos parciais da estratégia de ação sobre o cumprimento da missão da empresa, sendo consideradas duas situações distintas: a primeira, caracterizada por um julgamento de preferências isento de incertezas, ou seja, as intensidades das ligações partindo de cada conceito-atributo foram rotuladas com graus de pertinência unitários e a segunda, para a qual alguns julgamentos de preferências foram definidos com um certo grau de incerteza associado.

c.1) Julgamentos sem incerteza:

Nessa primeira situação, os efeitos parciais de cada linha de argumentação, considerando os rótulos que aparecem no mapa da Figura A.3.14, foram obtidos como:

<p>1º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 1</p> $EP_{1-2-8-11} = \min \{e_{1-2}, e_{2-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte} \text{ (valor numérico = 4)}$
<p>2º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 2</p> $EP_{1-3-8-11} = \min \{e_{1-3}, e_{3-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte} \text{ (valor numérico = 4)}$
<p>3º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 3</p> $EP_{1-3-9-11} = \min \{e_{1-3}, e_{3-9}, e_{9-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Forte}\} = \text{Forte} \text{ (valor numérico = 4)}$
<p>4º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 4</p> $EP_{1-4-8-11} = \min \{e_{1-4}, e_{4-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte} \text{ (valor numérico = 4)}$
<p>5º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 5</p> $EP_{1-4-9-11} = \min \{e_{1-4}, e_{4-9}, e_{9-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Forte}\} = \text{Forte} \text{ (valor numérico = 4)}$
<p>6º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6</p> $EP_{1-5-10-11} = \min \{e_{1-5}, e_{5-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Muito Forte} \text{ (valor numérico = 5)}$
<p>7º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6</p> $EP_{1-6-10-11} = \min \{e_{1-6}, e_{6-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Muito Forte} \text{ (valor numérico = 5)}$
<p>8º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6</p> $EP_{1-7-10-11} = \min \{e_{1-7}, e_{7-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Moderado}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Moderado} \text{ (valor numérico = 3)}$

Os termos linguísticos associados a cada efeito parcial vêm acompanhados pelos respectivos valores numéricos, obtidos após a defuzzyficação da variável linguística. Com os efeitos parciais obtidos, determina-se o efeito total da estratégia sobre a missão a empresa.

$$ET_{1-11} = \max \{EP_{1-2-8-11}, EP_{1-3-8-11}, EP_{1-3-9-11}, EP_{1-4-8-11}, EP_{1-4-9-11}, EP_{1-5-10-11}, EP_{1-6-10-11}, EP_{1-7-10-11}\} = \max \{\text{Moderado}, \text{Forte}, \text{Forte}, \text{Forte}, \text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Moderado}\} = \text{Muito Forte}$$

Por uma questão de simplificação da análise, os rótulos associados com as ligações entre o conceito-missão e cada conceito-atributo, foram arbitrados.

c.2) Julgamentos com incerteza:

O julgamento incerto é caracterizado pela rotulação atribuída a cada ligação do mapa, que parte de cada conceito-atributo, conforme o mapa mostrado na Figura A.3.17.

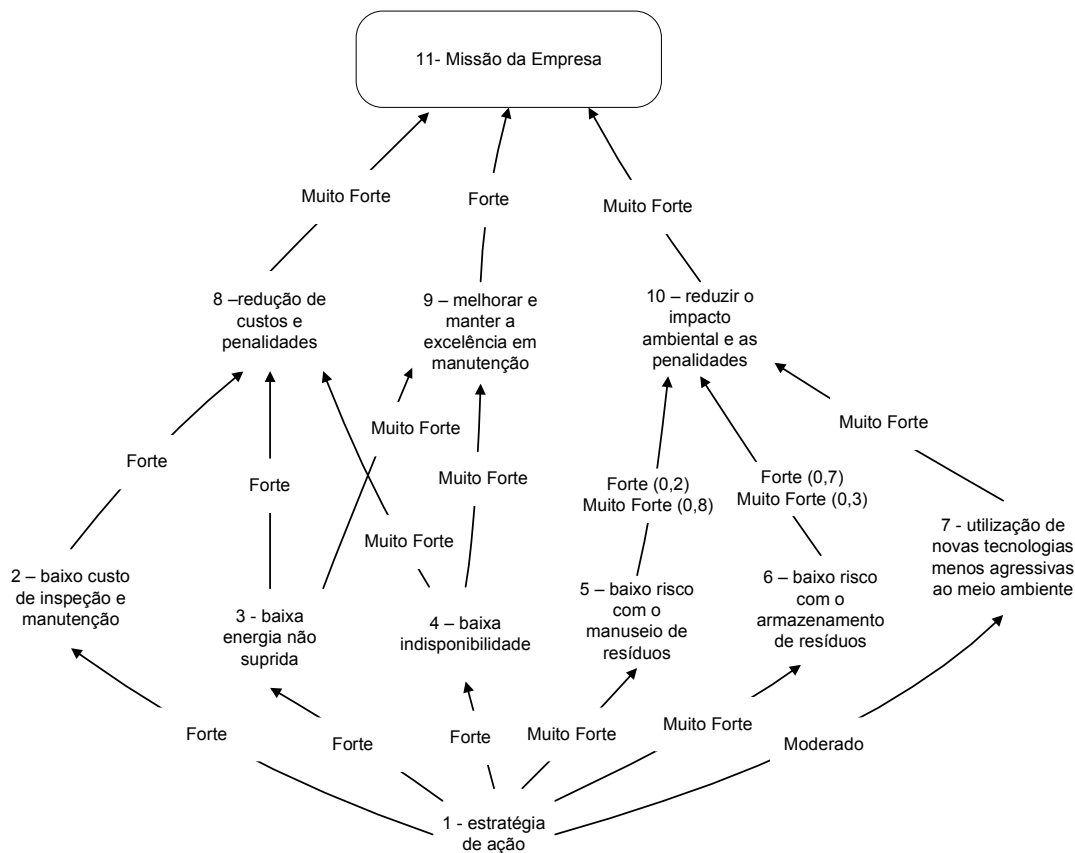


Figura A.3.17 – Exemplo de um mapa causal *fuzzy* com julgamentos incertos.

Observa-se que a incerteza aparece na definição das intensidades e_{5-10} e e_{6-10} , relativas às ligações 5-10 e 6-10 e que representam, respectivamente, as influências do manuseio e do armazenamento seguro dos resíduos gerados pela manutenção, sobre a redução do impacto ambiental e das penalidades associadas. Na impossibilidade de um julgamento com 100 % de certeza, tais intensidades foram rotuladas como “Forte” e “Muito Forte”, com graus de pertinência distintos (valores entre parêntesis no mapa), sendo o manuseio do resíduo, o

aspecto considerado o de maior importância para a redução do impacto ambiental.

Para essa situação de incerteza, os efeitos parciais de cada linha de argumentação foram obtidos como a seguir, observando-se que apenas os efeitos relativos às linhas 1-5-10-11 e 1-6-10-11, são diferentes daqueles apresentados para a situação de julgamento sem incerteza.

1º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 1 $EP_{1-2-8-11} = \min \{e_{1-2}, e_{2-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte}$ (valor numérico = 4)
2º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 2 $EP_{1-3-8-11} = \min \{e_{1-3}, e_{3-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte}$ (valor numérico = 4)
3º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 3 $EP_{1-3-9-11} = \min \{e_{1-3}, e_{3-9}, e_{9-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Forte}\} = \text{Forte}$ (valor numérico = 4)
4º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 4 $EP_{1-4-8-11} = \min \{e_{1-4}, e_{4-8}, e_{8-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Forte}$ (valor numérico = 4)
5º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 5 $EP_{1-4-9-11} = \min \{e_{1-4}, e_{4-9}, e_{9-11}\} = \min \{\text{Forte}, \text{Muito Forte}, \text{Forte}\} = \text{Forte}$ (valor numérico = 4)
6º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6 $EP_{1-5-10-11} = \min \{e_{1-5}, e_{5-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Muito Forte}, \text{Forte}(0,2)/\text{Muito Forte}(0,8), \text{Muito Forte}\} = \text{Forte}(0,2)/\text{Muito Forte}(0,8)$ (valor numérico = 4,76)
7º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6 $EP_{1-6-10-11} = \min \{e_{1-6}, e_{6-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Muito Forte}, \text{Forte}(0,7)/\text{Muito Forte}(0,3), \text{Muito Forte}\} = \text{Forte}(0,7)/\text{Muito Forte}(0,3)$ (valor numérico = 4,33)
8º) Efeito Parcial Sobre a Missão Considerando a Linha de Argumentação 6 $EP_{1-7-10-11} = \min \{e_{1-7}, e_{7-10}, e_{10-11}\} = \min \{\text{Moderado}, \text{Muito Forte}, \text{Muito Forte}\} = \text{Moderado}$ (valor numérico = 3)

Na Figura A.3.18, apresentam-se as regras disparadas para a obtenção do efeito parcial $EP_{1-5-10-11}$, referente à linha de argumentação 1-5-10-11 do mapa *fuzzy*. O encadeamento dessas regras, utilizando-se o modo de busca em profundidade, é apresentado na Figura A.3.19, devendo-se observar que a dimensão dessa árvore está diretamente associada com as dimensões do mapa *fuzzy* (número de conceitos e de ligações).

```

(defrule Rinf6
  (LIG2 Forte)
  (or (LIG3 Forte) (LIG3 MuitoForte))
=>
  (assert(PARCIAL1 Forte))
)

(defrule Rinf8
  (LIG2 MuitoForte)
  (LIG3 MuitoForte)
=>
  (assert(PARCIAL1 MuitoForte))
)

(defrule Rinf15
  (PARCIAL1 Forte)
  (or (LIG1 Forte) (LIG1 MuitoForte))
=>
  (assert(LINHA Forte))
)

(defrule Rinf16
  (LIG1 MuitoForte)
  (PARCIAL1 MuitoForte)
=>
  (assert(LINHA MuitoForte))
)

```

Figura A.3.18 – Regras disparadas para a obtenção do efeito parcial EP₁₋₅₋₁₀₋₁₁.

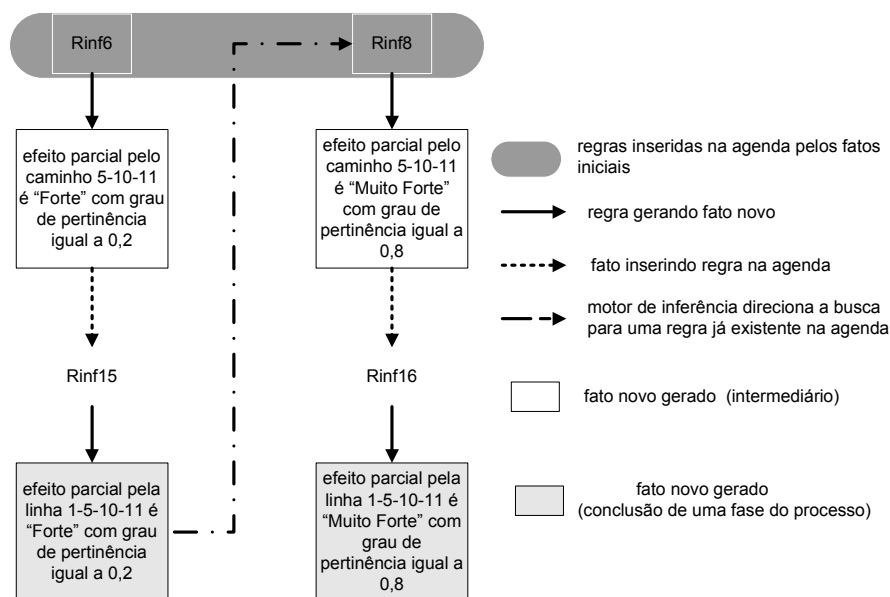


Figura A.3.19 – Árvore de busca para a obtenção do efeito parcial EP₁₋₅₋₁₀₋₁₁.

Na Figura A.3.20, ilustram-se as funções de pertinência associadas aos efeitos parciais passando pelas linhas 1-5-10-11 e 1-6-10-11, sendo os mesmos caracterizados como consequentes das regras que foram disparadas durante o processo de inferência causal, baseado nas operações com Conjuntos *Fuzzy*. Ilustram-se, nessa figura, os valores numéricos associados a cada efeito parcial, obtidos após a defuzzyficação das variáveis linguísticas, pelo método do centróide.

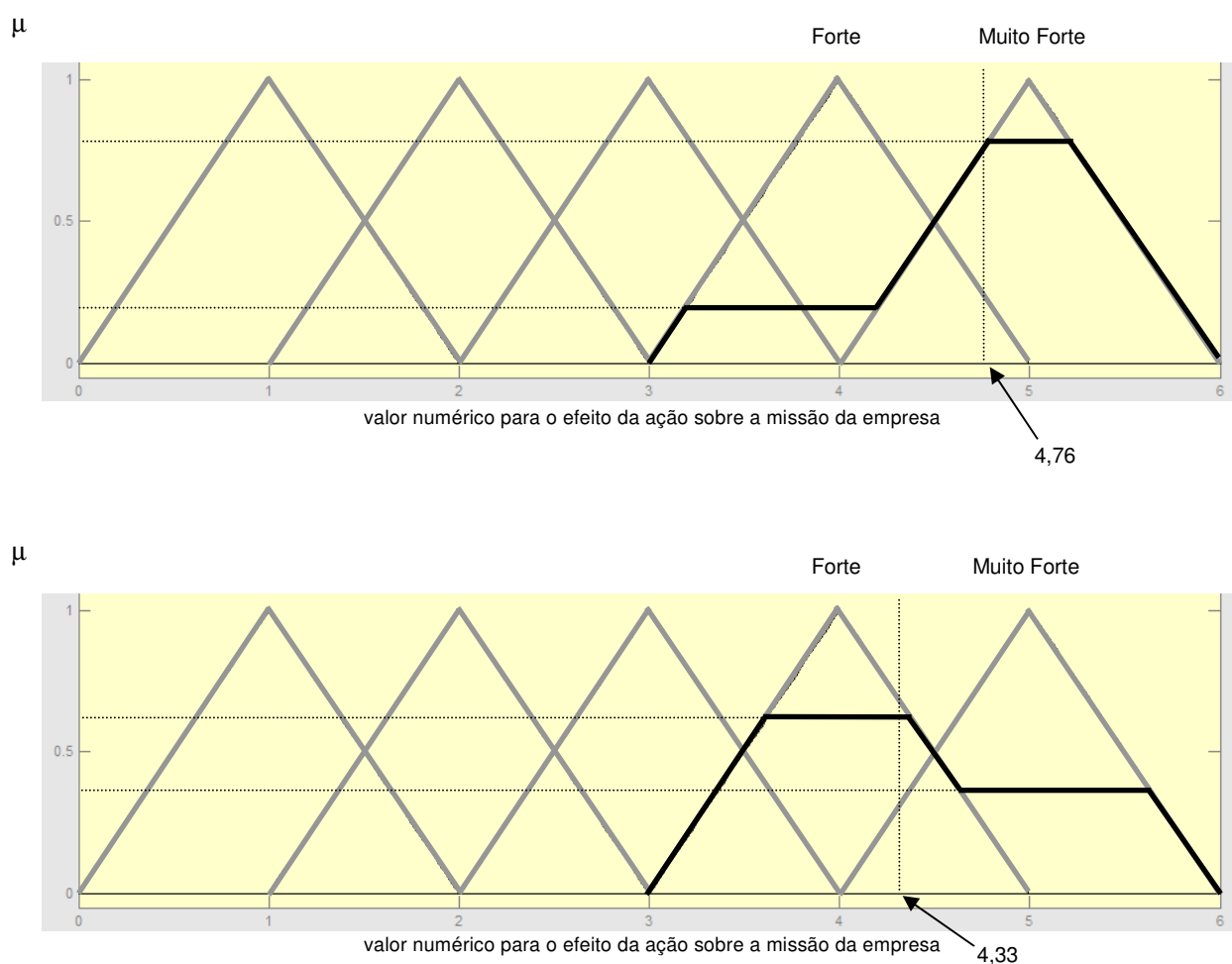


Figura A.3.20 – Funções de pertinência da variável “efeito sobre a missão da empresa” e defuzzyficação pelo método do centróide.

Considerando-se os resultados obtidos para os efeitos parciais, a definição do efeito total do conceito-ação sobre o conceito-missão, depende do tratamento dado à incerteza. Se no exemplo em análise, todos os resultados, independentemente dos graus de pertinência associados, forem aceitos, o efeito total ET_{1-1} será Forte(0,2)/Muito Forte(0,8), correspondente à linha de argumentação 1-5-10-11, para o qual foi obtido um maior valor numérico após a defuzzyficação (4,76). Em outras palavras, considera-se que pela linha 1-5-10-11, se está mais próximo da maximização do efeito do conceito-ação sobre o conceito missão, independentemente do grau de certeza associado a esse fato.

Nas situações em que se pretende definir valores mínimos para os graus de pertinência dos resultados produzidos pela inferência causal, por meio dos cortes α , já mencionados na Seção A.3.2, resultados diferentes serão obtidos. Por exemplo, para um valor para $\alpha = 0,5$, os efeitos parciais pelas linhas 1-5-10-11 e 1-6-10-11 seriam:

$EP_{1-5-10-11} = \text{Muito Forte}(0,8)$ (valor numérico = 5)

$EP_{1-6-10-11} = \text{Forte}(0,7)$ (valor numérico = 4)

Nesse caso, o efeito total ET_{1-1} corresponderia ao efeito parcial $EP_{1-5-10-11}$.

Em uma situação extrema, para a qual toda a incerteza fosse desconsiderada, os efeitos parciais referentes aos caminhos 1-5-10-11 e 1-6-10-11 não teriam sido determinados e o efeito total seria “Forte”, com valor numérico igual a 4, correspondente, aos efeitos parciais das linhas 1-2-8-11, 1-3-8-11, 1-3-9-11, 1-4-8-11 e 1-4-9-11.

O tratamento dado à incerteza, como no exemplo aqui apresentado, é particularmente importante, nas situações em que duas ou mais estratégias de ação estiverem sendo comparadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; 2007a. Resolução N° 496, de 26 de Junho de 2007. Estabelece as receitas anuais permitidas para as concessionárias de transmissão de energia elétrica, pela disponibilização das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica e das demais instalações de transmissão, e dá outras providências.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; 2007b. Resolução N° 270, de 26 de Junho de 2007. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica, e dá outras providências.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; 2006. Nota Técnica N° 302/2006-SER/ANEEL. Metodologia e Cálculo da Taxa de Remuneração das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica.

ANDERS, G. J.; 1990. *Probability Concepts in Electric Power Systems*. Wiley Interscience.

ANDERS, G. J.; ENDRENYI, J.; 2005. A Probabilistic Approach to Life Cycle Management. In: POWER TECH 2005 (June 2005: St. Petesburg). *Proceedings*. p. 1-6.

ANDERS, G. J.; ENDRENYI, J.; YUNG, C.; 2001. Risk-Based Planner for Asset Management. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 14, n. 4 (Oct.), p. 20-26.

ARSHAD, M.; ISLAM, S. M.; 2006. A Novel Fuzzy Logic Technique for Power Transformer Asset Management. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE. 41st IAS ANNUAL MEETING (Oct. 2006). *Conference Record*. v. 1, p. 276-286.

ARSHAD, M.; ISLAM, S. M.; KHALIQ, A.; 2004. Power Transformer Asset Management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY – POWERCON 2004 (Nov. 2004: Singapore). v. 2, p. 1395-1398.

ARVIND, D.; KHUSHDEEP, S.; DEEPAK, K.; 2008. Condition Monitoring of Power Transformer: A Review. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION. T & D IEEE/PES (Apr. 2008: Chicago). p. 1-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT; 1982. *Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço*, NBR-7274. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT; 1994. *Confiabilidade e Manutenibilidade*, NBR-5462. Rio de Janeiro.

AXELROD, R.; 1976. *Structure of Decision – The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton: Princeton Univ. Press.

BANA E COSTA, C. A.; 1993a. Três Convicções Fundamentais na Prática do Apoio à Decisão. *Revista Pesquisa Operacional*. v. 13, n. 1 (Junho).

BANA E COSTA, C. A.; 1993b. Processo de Apoio à Decisão: Problemáticas, Actores e Acções. *Material Didático do Curso de Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão*. Escola de Novos Empreendedores da UFSC, Agosto.

BANA E COSTA, C. A.; 1995. O que Entender por Tomada de Decisão Multicritério ou Multiobjectivo ?. *Material Didático do Curso de Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão*. Escola de Novos Empreendedores da UFSC.

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J. M.; VANSNICK, J. C.; 2005. M-MACBETH – Versão 1.1 – Manual do Usuário.

BANA e COSTA, C. A. *et al.*; 1999. Decision Support Systems in Action: Integrated Application in a Multicriteria Decision Aid Process. *European Journal of Operational Research*, v. 113, p. 315-335.

BANA e COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C.; 1995. Uma Nova Abordagem ao Problema da Construção de uma Função de Valor Cardinal: MACBETH. *Investigação Operacional*, v. 15 (Junho), p. 15-35.

BILLINTON, R.; LIAN, G.; 1993. Station Reliability Evaluation Using a Monte Carlo Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3 (July), p. 1239-1245.

BILLINTON, R.; WANG, P.; 1999. Teaching Distribution System Reliability Evaluation Using Monte Carlo Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 2 (May), p. 397-403.

BRASIL; 2002. Lei Nº 10.637, de 30 de Dezembro de 2002. Dispõe sobre a não-cumulatividade na cobrança da contribuição para os Programas de Integração Social (PIS) e de Formação do Patrimônio do Servidor Público (Pasep), nos casos que especifica; sobre o pagamento e o parcelamento de débitos tributários federais, a compensação de créditos fiscais, a declaração de inaptidão de inscrição de pessoas jurídicas, a legislação aduaneira, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 31 de Dezembro de 2002.

BRASIL; 2003. Lei Nº 10.833, de 29 de Dezembro de 2003. Altera a Legislação Tributária Federal e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 30 de Dezembro de 2003.

BROWN, R. E.; HUMPHREY, B. G.; 2005. Asset Management for Transmission and Distribution. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 3 (May/June), p. 39-45.

BUTERA, R.; 2000. Asset Management for the Distribution Pole Plant-Closing the Performance Gap Between Traditional Maintenance and Asset Management. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING (July 2000: Seattle). v. 1, p. 561-565.

CAMARGO, C. C. B.; 1981. *Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

CAMARGO, C. C. B.; CASTELLA, M. C.; 2003. Análise Crítica da Área de Manutenção da Itaipu Binacional. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia). *Anais*.

CASTILLO, E. V.; 2003. *Aplicação de Ontologia e Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

CASTRO, A. L.; MELLO, J. C. O.; 2003. Análise Econômico-financeira de Empreendimentos de Transmissão: Modelagem da Parcela Variável e Impactos sobre o Investimento. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia). *Anais*.

CHURCHILL, J.; 1990. Complexity and Strategic Decision-Making. In: *Éden, C.; Radford, J. (eds.) Tackling Strategic Problems*. London: Sage. p. 11-17.

COSTA, A. L.; 1995. *Determinação Ótima do Intervalo entre as Manutenções Preventivas de Equipamentos Elétricos*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

DA MOTTA, S. B.; COLOSIMO, E. A.; 2003. Impactos da Manutenção e dos Custos da não Confiabilidade de Equipamentos Sobre as Receitas de Serviços de Transmissão de Energia Elétrica. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia) *Anais*.

DA SILVA, A. M. L.; ENDRENYI, J.; 1994. Application of First Passage Times in the Markov Representation of Electric Power Systems. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILITY METHODS APPLIED TO ELECTRIC POWER SYSTEMS. *Proceedings*. Rio de Janeiro, v. 1, p. 259-265.

DE MELLO, A. O. P. B.; 2008. *Os Investimentos no Setor Elétrico*. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DE SIQUEIRA, I. P.; 2003. Otimização da Frequência da Manutenção Centrada na Confiabilidade. . In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia). *Anais*.

DOS SANTOS, E. C. C.; 2003. Uma Contribuição ao Gerenciamento da Indisponibilidade com Enfoque na Manutenção de Equipamentos de Subestações. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia). *Anais*.

DUVAL, M.; 1989. Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. v. 5, n. 6 (Nov./Dec.), p. 22-27.

DUVAL, M., DE PABLO, A.; 2001. Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. v. 17, n. 2 (Mar./Apr.), p. 31-41.

EDEN, C.; 1988. Cognitive Mapping. *European Journal of Operational Research*, v. 36, p. 1-13.

ENDRENYI, J. *et al.*; 2001. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 4 (Nov.), p. 638-646.

ENDRENYI, J.; ANDERS, G. J.; DA SILVA, A. M. L.; 1998. Probabilistic Evaluation of the Effect of Maintenance on Reliability – An Application. *IEEE Transaction on Power Systems*. v. 13, n. 2 (May), p. 576-583.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S. M.; 2001. *Apoio à Decisão – Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas*. 1ª Edição. Florianópolis: Editora Insular.

FLORES, W. *et al.*; 2007. Vida de Transformadores de Potencia Sumergidos em Aceite: Situación Actual. Parte II. Correlación entre Resultados de Ensayos Físico-químicos. *IEEE Latin America Transactions*. v. 5. n. 8 (Dec.), p. 591-598.

GIARRATANO, J.; RILEY, G.; 1989. *Expert System – Principles and Programming*. Boston: Publishing Company.

GOCKENBACH, E.; BORSI, H.; 2008. Condition Monitoring and Diagnosis of Power Transformers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (Apr. 2008: Beijing). p. 894-897.

HOSKINS, R. P.; STRBAC, G.; BRINT, A.; 1999. Modeling the Degradation of Condition Indices. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 146, n. 4 (July), p. 386-392.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE, 1991. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers – IEEE Std C57.104-1991*.

KLIR, G. J.; FOLGER, T. A.; 1988. *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*. New Jersey: Prentice Hall PTR.

KLIR, G. J.; YUAN, B.; 1995. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR.

KOSKO, B.; 1986. Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 24, p. 65-75.

KOSTIC, T.; 2003. Asset Management in Electrical Utilities: How Many Facets it Actually Has. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING (July 2003). v. 1, p. 275-281.

LARICHEV, O. I. *et al.*; 1995. Numerical vs Cardinal Measurements in Multiattribute Decision Making: How Exact is Enough ?. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, v. 64, n. 1 (Oct.), p. 9-21.

LARICHEV, O. I.; BROWN, R. V.; 2000. Numerical and Verbal Decision Analysis: Comparison on Practical Cases. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v. 9, p. 263-273.

LEHTONEN, M.; 2006. On the Optimal Strategies of Condition Monitoring and Maintenance Allocation in Distribution Systems. In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS (June 2006: Stockholm). p. 1-5.

LIN, G. P.; YANG, J. B.; WHIDBORNE, J. F.; 2003. *Multiobjective Optimization and Control*. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd.

LÚCIO, J. C. M.; TEIVE, R. C. G.; 2006. Uma Metodologia para a Estruturação do Problema de Gerenciamento de Ativos Incorporando Conhecimento Multi-especialista. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (Salvador 2006). *Anais*.

LÚCIO, J. C. M.; TEIVE, R. C. G.; 2007a. Sistema Especialista de Suporte à Decisão para o Gerenciamento de Ativos nas Empresas do Setor Elétrico. In: XII ENCONTRO ÍBERO-AMERICANO DO CIGRÉ (Foz do Iguaçu). *Anais*.

LÚCIO, J. C. M.; TEIVE, R. C. G.; 2007b. Fuzzy Causal Maps for Asset Management: An Approach for Problem-Structuring and Multi-Criteria Evaluation in Electrical Utilities. In: POWER TECH 2007 (July 2007: Lausanne). *Proceedings*. p. 2201-2206.

LÚCIO, J. C. M.; TEIVE, R. C. G.; 2008. Abordagem Fuzzy para o Diagnóstico de Falhas em Transformadores - Uma Ferramenta para o Gerenciamento de Ativos no Setor Elétrico. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (Juiz de Fora 2008). *Anais*.

MIETTINEN, K. M.; 1999. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

MILASCH, M.; 1984. *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

MOHSENI, M.; 2003. What does Asset Management Mean to You ?. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION (Sept. 2003). v. 3, p. 962-964.

MONTIBELLER NETO, G.; 1996. *Mapas Cognitivos: Uma Ferramenta de Apoio à Estruturação de Problemas*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

MONTIBELLER NETO, G.; 2000. *Mapas Cognitivos Difusos na Construção do Problema e Exploração do Impacto de Alternativas nos Valores do Tomador de Decisão*. Florianópolis. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

MORAIS, D. R.; 2004. *Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

MOREIRA, M. P.; SANTOS, L. T. B.; VELLASCO, M. M. B. R.; 2007. Power Transformers Diagnosis Using Neural Networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (Aug. 2007: Orlando). *Proceedings*. p. 1929-1934.

MORTON, K.; 1999. Asset Management in the Electricity Supply Industry. *Power Engineering Journal*, v. 13, n.5 (Oct.), p. 233-240.

NUNES Jr., J. L.; MONTEIRO, M. J.; LOPES, A. C., 2005. Recuperação Ambiental de Área Afetada por Vazamento de Óleo em Acidente em Subestação da Transmissão Paulista. In:

XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2005: Curitiba) *Anais*.

NUÑEZ, J. L. T.; 2004. *Modelo para o Gerenciamento de Ativos de Transmissão de Energia Elétrica*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

OLIVEIRA, J. T.; 2003. Gerenciamento de Riscos em Instalações Elétricas Utilizando Técnicas de manutenção Centrada na Confiabilidade. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia) *Anais*.

OSTERGAARD, J.; JENSEN, A. N.; 2001. Can We Delay the Replacement of This Component ? – An Asset Management Approach to the Question. In: 16th INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (June 2001). *Anais*. v. 5, p. 18-21.

PACHECO, R. L.; 2005. *Avaliação Formativa Continuada do Processo Educativo em Engenharia Usando Mapas Cognitivos Difusos*. Florianópolis. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

PALOLA, J. *et al.*; 2006. Investment Portfolio Tool Specification for an Electrical Network Asset Manager. In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS (June 2006: Stockholm). p. 1-8.

PENGXIANG, B. *et al.*; 2005. Practice and Strategy for Condition Based Maintenance of Power Supply Equipment. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA AND PACIFIC (2005: Dalian). p. 1-5.

PETRILLO, F. S.; 2007. *Manutenção em Sistemas de Transmissão – Dos Conceitos às Estratégias Adotadas no Brasil*. Florianópolis. Monografia para a Especialização em Engenharia Elétrica. - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

QUAK, B. *et al.*; 2003. Fundamental Aspects of Information Processing and the Decision Process to Support Asset Management. In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS (June 2003: Nagoya). *Proceedings*. v. 3, p. 982-985.

RIMELL, J.; 1999. The Importance of Asset Data to Support an Effective Asset Management Policy. In: IEE SEMINAR ON INTEGRATING TECHNOLOGIES INTO DISTRIBUTION SYSTEMS (May 1999: Birmingham). p. 4/1 – 4/8.

ROIZMAN, O.; DAVYDOV, V.; 1999. Neuro-Fuzzy Computing for Large Power Transformers Monitoring and Diagnostics. In: FUZZY INFORMATION PROCESSING

SOCIETY. 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE NORTH AMERICA (July 1999: New York). p. 248-252.

ROGERS, R. R.; 1975. UK Experiences in the Interpretation of Incipient Failures in Power Transformers by Dissolved Gas-in-oil Chromatography Analysis (A Progress Report). In: FORTY-SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOUBLE CLIENTS. Section 1 – 201.

ROY, B.; 1993. Decision Science or Decision-Aid Science ?. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 184-203.

ROY, B.; 1996. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

SCOTT, A. C.; CLAYTON, J. E.; GIBSON, E. L.; 1991. *A Practical Guide to Knowledge Acquisition*. Addison-Wesley Publishing Company.

SETAYESHMEHR, A. *et al.*; 2004. A Procedure for Diagnosis and Condition Based Maintenance for power Transformers. In: 2004 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION (Sept. 2004: Indianapolis). *Conference Record*. p. 504-507.

SHAHIDEHPOUR, M.; FERRERO, R.; 2005. Time Management for Assets – Chronological Strategies for Power System Asset Management. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 3 (May/June), p. 32-38.

SIM, S. H.; ENDRENYI, J.; 1988. Optimal Preventive Maintenance with Repair. *IEE Transactions on Reliability*, v. 37, n. 1 (Apr.), p. 92-96.

STEED, J. C.; 1998. Aspects of How Asset Management can be Influenced by Modern Condition Monitoring and Information Management Systems. IEE COLOQUIUM ON HV MEASUREMENTS, CONDITION, MONITORING AND ASSOCIATED DATABASE HANDLING STRATEGIES (June 1998: London). v. 3, n. 3, p. 3/1 – 3/10.

TAKAHASHI, T.; OKAMOTO, T.; 2008. Study of Maintenance Strategy Support Tools for Electric Power Apparatus. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (Apr. 2008: Beijing). p. 579-581.

TANSCHUIT, R.; 2003. Sistemas Fuzzy. In: VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (Setembro:Bauru, São Paulo). *Anais de Minicursos*.

TONDELLO, C. J.; 2001. *Uma Metodologia para Gerenciamento do Risco de Empresas de Transmissão*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

TOR, O.; SHAHIDEHPOUR, M.; 2006. Power Distribution Asset Managerment. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING (Montreal). p. 1-7.

TVERSKY, A.; KAHNEMAN, D.; 1974. Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, v. 185, p. 1125-1131.

ULYSSÉA, M. S.; 2002. *Definição da Periodicidade Ótima da Manutenção Preventiva de Relés de Proteção*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

VASCONCELLOS, V.; 2003. Plano de Ação para Substituição de Transformadores de Potência. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Outubro 2003: Uberlândia) *Anais*.

WATERMAN, D. A.; 1986. *A Guide to Expert Systems*. Addison-Wesley Publishing Company.

WATSON, S. R.; BUEDE, D. M.; 1987. *Decision Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press.

YADAV, R. *et al.*; 2008. Condition Based Maintenance of Power Transformer : A Case Study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (Apr. 2008: Beijing). p. 502-504.

ZADEH, L. A.; 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353.

ZHANG, W. R.; CHEN, S. S.; BEZDEK, J. C., 1989. Pool2: A Generic System for Cognitive Map Development and Decision Analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 19, n. 1 (Jan./Feb.), p. 31-39.

ZIRBES, R; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H.; 2005. Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral. *Revista Controle e Automação*, v. 16, n. 3 (Agosto/Setembro), p. 318-331.